

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE SISTEMA DE ÁGUA DE CHUVA PARA
IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR COM DÉFICIT HÍDRICO**

JULIANA FARIAS ARAUJO

FEIRA DE SANTANA, BA – BRASIL

2022

JULIANA FARIAS ARAUJO

**DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE SISTEMA DE ÁGUA DE CHUVA PARA
IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR COM DÉFICIT HÍDRICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Henrique Cohim
Borges Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Anderson de Souza Matos
Gadea

FEIRA DE SANTANA

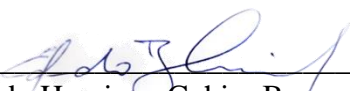
2022

DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE SISTEMA DE ÁGUA DE CHUVA PARA
IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR COM DÉFICIT HÍDRICO

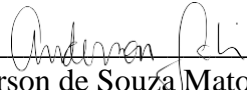
Juliana Farias Araujo

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE
FEIRA DE SANTANA, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

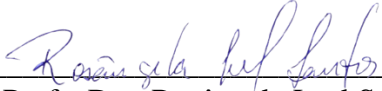
Banca Examinadora:



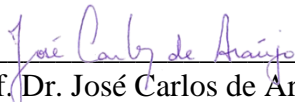
Prof. Dr. Eduardo Henrique Cohim Borges Silva (Orientador)
(Universidade Estadual de Feira de Santana)



Prof. Dr. Anderson de Souza Matos Gadea (Co-orientador)
(Universidade Estadual de Feira de Santana)



Profa. Dra. Rosângela Leal Santos
(Universidade Estadual de Feira de Santana)



Prof. Dr. José Carlos de Araújo
(Universidade Federal do Ceará)

FEIRA DE SANTANA, BA – BRASIL

2022

Ficha Catalográfica – Biblioteca Central Julieta Carteado

S687d Araújo, Juliana Farias
Dimensionamento ótimo de sistema de água de chuva para irrigação
suplementar com déficit hídrico / Juliana Farias Araújo., 2022.
82f.: il.

Orientador: Eduardo Henrique Cohim Borges Silva
Coorientador: Anderson de Souza Matos Gadea
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de
Santana, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e
Ambiental, 2022.

1. Cisternas de produção - Deficit hídrico. 2. Engenharia Civil e
Ambiental - Cisternas no semiárido - Otimização. 3. Toroh -
Dimensionamento de cisternas. I. Silva, Eduardo Henrique Cohim
Borges, orient. II. Gadea, Anderson de Souza, coorient. II. Universidade
Estadual de Feira de Santana. III. Título.

CDU: 624

Bibliotecária: Tatiane Santos CRB5ª / 1634

AGRADECIMENTOS

Ao chegar ao fim desta etapa tão importante em minha vida, eu não poderia de deixar de agradecer àqueles que me acompanharam.

Em primeiro lugar aos meus orientadores que tanto contribuíram para o meu crescimento desde o terceiro semestre da graduação. Professor Eduardo Cohim, muito obrigada pela confiança e por sempre ter mostrado tamanha competência e tantas outras qualidades admiráveis. Também sou muito grata ao Professor Gadea por tudo, principalmente, por tantas vezes ter me salvado nas simulações. Sempre com muita sagacidade e alegria. Sempre terão minha admiração.

Agradeço também aos membros da banca de qualificação e do projeto de mestrado por todas as contribuições e por evidenciarem pontos que não estavam claros ou que precisariam ser discutidos com mais atenção.

Aos alunos de Iniciação Científica: Carol, Jadson, Caio e Gércio. Sem vocês este trabalho não teria como ser finalizado.

À Universidade Estadual de Feira de Santana e ao PPGCEA pela oportunidade de realização do curso. Muito obrigada, professores, amigos e funcionários. Em especial a Brendhy, Andrezza, Adailza e Paulinha. E a Mari, por toda disponibilidade, atenção e simpatia.

À FAPESB pelo apoio financeiro, permitindo minha dedicação integral para o desenvolvimento da pesquisa.

E à CAPES, pois o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Por último, mas não menos importante, aos meus pais, ao meu irmão e ao meu namorado por fortalecerem minhas decisões. Sou muito sortuda por ter vocês por perto.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGECEA/UEFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE SISTEMA DE ÁGUA DE CHUVA PARA IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR COM DÉFICIT HÍDRICO

Juliana Farias Araujo

2022

Orientador: Eduardo Henrique Borges Cohim Silva, D Sc:

Co-orientador: Anderson de Souza Matos Gadea, D Sc:

Programa: Engenharia Civil e Engenharia Ambiental

A irrigação suplementar com déficit hídrico, associada aos sistemas de aproveitamento de água de chuva (SAAC), possibilitam reduzir as perdas da produção agrícola no semiárido. Nesse contexto, neste trabalho são apresentados três artigos dedicados a explorar o potencial e a viabilidade financeira dessas práticas, além de ser proposta uma metodologia para realizar o dimensionamento otimizado do SAAC para atender não apenas à demanda agrícola, mas também à pecuária, baseada no balanço hídrico seriado com intervalo diário e na determinação da combinação de área de captação e volume das cisternas que minimiza os custos de construção do SAAC. Com o intuito de automatizar isso, também é apresentada uma versão atualizada da ferramenta computacional TOROH. Como resultado, verificou-se, a partir de simulações no *software Deficit Irrigation Toolbox* (DIT), que a irrigação suplementar com déficit hídrico possibilita aumentar a produção do tomate em 80% comparada com a condição de sequeiro, na região de Feira de Santana – Bahia - Brasil. Essa demanda pode ser suprida, com Eficiência de Atendimento de 91,7%, pela água armazenada no SAAC composto por dimensões padrões estabelecidos pelo Programa Uma Terra e Duas Águas, a saber: cisterna com 52 m³ e área de captação de 200 m². Também se constatou que o SAAC ótimo para atender à demanda da cebola na mesma região corresponde ao formado pela área de captação de 130 m² e por uma cisterna de 36,1 m³. Por fim, foram apresentadas algumas funcionalidades do TOROH e essa ferramenta apresentou bom desempenho no dimensionamento do SAAC para atender a três demandas, a saber: a da irrigação suplementar com déficit hídrico utilizada no cultivo do milho em uma área de plantação de 4.000 m², a de dois rebanhos de 50 cabras por ano e a conjunta resultante da soma dessas duas. Para a primeira situação, também foi verificada, no TOROH, a viabilidade financeira da implementação do SAAC e do sistema de irrigação por gotejamento, sendo obtido Valor Presente Líquido positivo de R\$12.843,3 e quociente entre receitas e custos de 1,57.

Palavras-chave: Cisternas de produção. Agropecuária familiar. Sistemas descentralizados de água. Dimensões ótimas. Irrigação eficiente.

Abstract of Dissertation presented to PPGECEA / UEFS as part of the necessary requirements to obtain the degree of Master of Science (M.Sc.)

OPTIMUM SIZING OF RAIN WATER SYSTEM FOR SUPPLEMENTARY IRRIGATION WITH WATER DEFICIT

Juliana Farias Araujo

2022

Advisor: Eduardo Henrique Borges Cohim Silva, D Sc:

Advisor: Anderson de Souza Matos Gadea, D Sc:

Program: Civil Engineering and Environmental Engineering

Supplementary irrigation with water deficit, associated with rainwater harvesting systems (RHS), make it possible to reduce agricultural production losses in the semi-arid region. In this context, this work presents three articles dedicated to exploring the potential and financial viability of these practices, in addition to proposing a methodology to perform the optimized sizing of the RHS to meet not only agricultural demand, but also livestock, based on the balance sheet serial water supply with daily intervals, and on determining the combination of catchment area and cistern volume that minimizes the construction costs of the RHS. In order to automate this, an updated version of the TOROH computational tool is also presented. As a result, it was found, from modeling in the Deficit Irrigation Toolbox (DIT) software, that supplementary irrigation with water deficit makes it possible to increase tomato production by 80% compared to the dryland condition, in the region of Feira de Santana – Bahia, Brazil. This demand can be met, with a Service Efficiency of 91.7%, by the water stored in the RHS composed of standard dimensions established by the One Land and Two Waters Program, namely: 52 m³ cistern and 200 m² catchment area. It was also found that the optimal RHS to meet the demand for onions in the same region corresponds to the one formed by the catchment area of 130 m² and a cistern of 36.1 m³. Finally, some TOROH features were presented and this tool performed well in RHS, sizing to meet three demands, namely: supplementary irrigation with water deficit used in corn cultivation in a 4,000 m² plantation area, of two of herds of 50 goats per year and the result of the sum of the other two. For the first situation, the financial feasibility of implementing the RHS and the drip irrigation system were also verified on TOROH, resulting in a positive Net Present Value of R\$12,843.3 and a ratio between revenues and costs of 1.57.

Keywords: production cisterns; family farming; decentralized water systems; optimal dimensions; efficient irrigation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Metodologia para definir a EA do SAAC no atendimento da irrigação. ...	26
Figura 2.2 – Representação gráfica de uma cisterna-calçadão	30
Figura 2.3 – Incremento na produção do tomate, em uma área de cultivo de 2.500 m ² , em função da lâmina total comparada com a situação da irrigação de sequeiro na região de Feira de Santana.....	30
Figura 2.4 – Produtividade da água em função da lâmina total no cultivo do tomate na região de Feira de Santana.....	31
Figura 2.5 – Volume de água simulado disponível na cisterna, considerando a demanda do tomate na região de Feira de Santana	33
Figura 3.1– Incremento da produção da cebola, em uma área de cultivo de 2.500 m ² , em função das lâminas totais na região de Feira de Santana.....	49
Figura 3.2 – Produtividade da água em função das lâminas no cultivo da cebola na região de Feira de Santana.....	50
Figura 3.3 – Equações de custo da construção da área de captação (a) e da cisterna (b)	51
Figura 3.4 – Custos envolvidos na construção dos componentes do sistema e o total para atender à demanda da cebola	51
Figura 3.5 – Volume de água simulado disponível na cisterna no atendimento da demanda da cebola e da criação das cabras conjuntamente com a cebola	52
Figura 3.6 – Custo de construção (R\$) <i>versus</i> área de cultivo (m ²)	54
Figura 4.1 – Equações de custo da construção da área de captação (a) e da cisterna (b)	67
Figura 4.2 – Representação do módulo de dimensionamento e otimização do SAAC em áreas rurais do TOROH: Demanda da irrigação suplementar com déficit hídrico utilizada no cultivo do milho em uma área de 4.000 m ² na região de Feira de Santana - Bahia...	68
Figura 4.3 – Representação do módulo de análise financeira em áreas rurais no TOROH	70
Figura 4.4 - Volume de água simulado disponível na cisterna, considerando a demanda do milho na região de Feira de Santana (1998-2017)	71
Figura 4.5 – Custos envolvidos na construção dos componentes do sistema e o total para demanda de 50 cabras na região de Feira de Santana (BA)	72
Figura 4.6 - Volume de água simulado disponível na cisterna, considerando a demanda do milho e das cabras na região de Feira de Santana (1998-2017)	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Dados necessários para calibrar o DIT e para modelar a profundidade da raiz ..	29
Tabela 2.2 – Parâmetros da precipitação e EA das cisternas-calçadão na região de Feira de Santana	32
Tabela 3.1 – Dados do solo e da cultura necessários para realizar as modelagens	48
Tabela 4.1– Dados do solo e da cultura necessários para realizar as modelagens	66
Tabela 4.2 – Insumos necessários para cada período o cultivo do milho, em uma área de 4.000 m ²	66
Tabela 4.3 – Custos de construção de cada combinação e o total do SAAC em Feira de Santana – BA	68
Tabela 4.4 – Investimentos para implantar o SAAC e o sistema de irrigação na região de Feira de Santana.....	69
Tabela 4.5 – Despesas anuais com os insumos para a produção do milho na região de Feira de Santana.....	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1- Avaliação dos artigos que atingiram nota superior a 7,5	44
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ASA – Articulação Semiárido Brasileiro

C – Custo

cm – Centímetro

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

CONDEL – Conselho Deliberativo

CV – Coeficiente de variação

DIT – *Deficit Irrigation Toolbox*

EA – Eficiência de Atendimento

ET0 – Evapotranspiração de referência

GET-OPTIS – Técnica Evolutiva Global para Programação Ótima de Irrigação

ha – Hectare

IAC – Índice de Anomalia de Chuva

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDH – Índice de Desenvolvimento Humano

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

kg – Quilo

km – Quilômetro

l – Litro

m – Metro

mm – Milímetros

NDC – Número de dias chuvosos

NDCSC – Número de Dias Consecutivos sem Chuvas

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis

ONU – Organização das Nações Unidas

P – Precipitação

P1+2 – Programa Uma Terra e Duas Águas

Re – Receita

SAAC – Sistemas de aproveitamento de água de chuva

SUDENE – Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste

t – Tonelada

VPL – Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL	13
1.1 INTRODUÇÃO GERAL	14
REFERÊNCIAS	19
CAPÍTULO 2 - O PAPEL DA CISTERNA-CALÇADÃO NO ATENDIMENTO DA IRRIGAÇÃO COM DEFICIT HÍDRICO EM REGIÕES SEMIÁRIDAS.....	22
2.1 INTRODUÇÃO.....	24
2.2 METODOLOGIA.....	25
2.2.1 DEMANDA DE IRRIGAÇÃO	26
2.2.2 VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE ATENDIMENTO DA CISTERNA-CALÇADÃO.....	27
2.2.3 ESTUDO DE CASO: CULTIVO DO TOMATE EM FEIRA DE SANTANA	28
2.2.3.1 Série de dados meteorológicos	28
2.2.3.2 Modelagem do crescimento da cultura	28
2.2.3.3 Análise do desempenho da cisterna-calçadão	29
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
2.5 AGRADECIMENTOS	36
REFERÊNCIAS	36
CAPÍTULO 3 - DIMENSÕES ÓTIMAS DA CISTERNA-CALÇADÃO NO SEMIÁRIDO: AGRICULTURA E PECUÁRIA	41
3.1 INTRODUÇÃO	43
3.2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA.....	44
3.3 METODOLOGIA.....	45
3.3.1 ALOCAÇÃO TEMPORAL E QUANTITATIVA DOS EVENTOS DE IRRIGAÇÃO	46
3.3.2 DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DO SAAC	47
3.3.3 ESTUDO DE CASO: CULTIVO DA CEBOLA EM FEIRA DE SANTANA	47
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
3.4.1 ESTUDO DE CASO	49
3.4.1.2 Dimensionamento otimizado dos SAACs	50
3.4.1.2 Análise de sensibilidade	53
3.5 CONCLUSÕES	54
3.6 FINANCIAMENTO DA PESQUISA	55
REFERÊNCIAS	55
CAPÍTULO 4 - TOROH: FERRAMENTA PARA DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE CISTERNAS	59
4.1 INTRODUÇÃO	61
4.2 METODOLOGIA.....	62
4.2.1 ESTUDOS DE CASO.....	64
4.2.1.1 Estudo de caso 1.....	65
4.2.1.2 Estudo de caso 2	67
4.2.1.3 Estudo de caso 3.....	67
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.3.1 ESTUDO DE CASO 1: ATENDIMENTO DA DEMANDA AGRÍCOLA.....	67
4.3.2 ESTUDO DE CASO 2: ATENDIMENTO DA DEMANDA DA PECUÁRIA	71

4.3.3 ESTUDO DE CASO 3: ATENDIMENTO DA DEMANDA DA PECUÁRIA E A DA AGRICULTURA.....	72
4.4 CONCLUSÕES	74
4.5 FINANCIAMENTO DA PESQUISA	75
REFERÊNCIAS	75
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO GERAL	80

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL

1.1 INTRODUÇÃO GERAL

Segundo a Resolução nº 150 do Conselho Deliberativo (CONDEL) da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), é necessário que pelo menos uma destas características sejam atendidas para o enquadramento na região semiárida brasileira: precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm, Índice de Aridez de Thorntwaite igual ou inferior a 0,50 ou percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano (BRASIL, 2021).

De acordo com a mesma Resolução, 1.427 municípios fazem parte dessa região, os quais estão espalhados pelo território de onze Unidades da Federação, a saber: Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Espírito Santos, Maranhão, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte, Sergipe e Minas Gerais (BRASIL, 2021).

Essas localidades são caracterizadas por apresentarem temperaturas elevadas, índices acentuados de evapotranspiração e precipitação com regime irregular. Ademais, o solo semiárido é majoritariamente raso e formado predominantemente sobre rochas de embasamento cristalino, principalmente metamórficas e ígneas, as quais são pouco porosas. Assim, dificulta-se a infiltração, resultando em pequenas trocas hídricas entre o rio e o substrato adjacente, gerando rios com regime predominantemente temporários e águas subterrâneas salobras e que apresentam baixa vazão (ARAÚJO, 2011; BAPTISTA; CAMPOS, 2014; CIRILO, 2008; MALVEZZI, 2007).

Historicamente essas características fizeram com que o semiárido fosse visto como espaço-problema, terra das secas, região de fome e da miséria. Assim, realizaram-se obras de engenharia para “corrigir o clima semiárido”, com o suposto objetivo de impulsionar o desenvolvimento econômico da região. Porém, os resultados dessas medidas não proporcionaram acesso à água e à riqueza à população, pois as benesses dessas construções estiveram vinculadas às elites, contribuindo para o aumento da dependência e da vulnerabilidade social (BURITI; BARBOSA, 2019; SILVA, 2003).

Um outro paradigma de políticas relacionadas com o semiárido surgiu na década de 1980, as quais buscam a convivência com a seca e não almejam combater esse fenômeno natural que sempre vai existir. Nesse contexto, objetiva-se melhorar a qualidade de vida dos sertanejos, tirando vantagens das potencialidades locais, considerando as fragilidades e os limites ambientais da região. Assim, viabiliza-se a sustentabilidade da agropecuária, valorizando e conservando as potencialidades dos recursos naturais e propõem-se soluções para o monitoramento, o alívio e a mitigação dos efeitos da seca sobre a produtividade (BRITO *et al.*, 2017; EMBRAPA, 2021).

Exemplos de iniciativas de convivência com a seca são as práticas eficientes de irrigação por gotejamento e os sistemas de aproveitamento de água de chuva (SAAC) que captam e guardam água da chuva que pode ser utilizada para fins domésticos e para finalidades produtivas.

Um tipo de tecnologia que promove a captação e armazenamento de água de chuva é a cisterna, a qual é uma tecnologia social, permitindo o envolvimento do indivíduo no processo construtivo, trazendo a ideia de protagonismo no espaço em que se encontra inserido. Além disso, as cisternas são fechadas, apresentando baixa perda por evaporação quando comparadas aos reservatórios com grande lâmina, e armazenam água de chuva, a qual apresenta uma qualidade superior a de outras fontes disponíveis no semiárido, as quais possuem altos teores de sais em decorrência das características geológicas dominantes do clima semiárido, tornando-a salobra e imprópria para o consumo humano e para a irrigação (ARAUJO; SANTOS, 2021; OWEIS; HACHUM, 2003; SÁNCHEZ; COHIM; KALID, 2015; SILVA; DOMINGOS, 2007; QADIR *et al.*, 2007).

Alguns programas sociais visam a incentivar a construção dessa tecnologia, a exemplo do Programa Uma Terra e Duas Águas (P1+2), o qual objetiva a construção de SAAC, como a cisterna-calçadão, para suprir a demanda da agricultura e da pecuária familiar, contribuindo para a garantia da segurança hídrica, alimentar e nutricional e para o desenvolvimento local por conta da geração de empregos e da movimentação da economia local com as vendas dos excedentes (ASA, 2021b).

No âmbito do P1+2, essas cisternas possuem volume de 52 m³ e as áreas de captação são constituídas por calçadões pavimentados de 200 m², baseada na captação dita necessária para que 300 mm de chuva abasteçam a cisterna totalmente. Porém, alguns estudos comprovam que essas dimensões não devem ser iguais para todos os usuários, pois a padronização tende a diminuir a eficiência dos sistemas. Como exemplo disso, alguns agricultores relatam que a água ofertada pelas cisternas não é suficiente para suprir a manutenção da família e as exigências hídricas das plantas durante o período de estiagem (ALMEIDA *et al.*, 2017; BRITO *et al.*, 2012; CAMPISANO; MODICA, 2012; COHIM; ORRICO, 2015; SANTANA, 2015).

Nesse sentido, é adequado que o dimensionamento do SAAC seja realizado para cada localidade familiar, considerando a precipitação média e sua distribuição, a demanda e a área de captação (ARAUJO; COHIM, 2016; GHISI, 2010). A partir disso, será possível atender com maior eficácia às exigências hídricas da agropecuária familiar,

principalmente no período de escassez, aumentando ainda mais os benefícios relacionados aos sertanejos e ao desenvolvimento da localidade.

O dimensionamento do SAAC considerando esses fatores já foi proposto anteriormente para suprir a demanda da pecuária e dos fins domésticos em área rural por Giffoni *et al.* (2019) e por Araujo e Cohim (2016), respectivamente. Porém, a definição da necessidade hídrica para a agricultura é mais complexa, pois vários fatores necessitam ser considerados, entre eles: os dados meteorológicos, as características do solo (capacidade de campo, ponto de murcha e teor de água inicial) e das culturas.

Em regiões onde é limitada a disponibilidade de água, é usual que se busque ainda a eficiência técnica e produtiva provocada pela alocação quantitativa e temporal dos eventos de irrigação, a qual também contribui para a redução de custos e dos riscos associados aos impactos ambientais, como a lixiviação. Essa alocação objetiva definir a série diária de demanda de irrigação que maximize a produção por unidade de volume de água, admitindo o déficit controlado de água e se contrapondo a irrigação convencional, a qual almeja o aumento da produção, suprimindo totalmente as necessidades de água da planta (COELHO *et al.*, 2021; FRIZZONE, 2007).

Destaca-se que a irrigação deficitária controlada também provoca o aumento da produção, pois, em uma localidade no semiárido baiano, Toyosumi *et al.* (2019) verificaram que a prática da irrigação deficitária controlada na fase de maturação do grão aumenta em 30% a produção por planta, quando comparada com a situação em que a laranjeira-pera não é irrigada.

Smilovic *et al.* (2019) realizaram essa alocação a partir de Curva de Produtividade da Água e constataram que é possível reduzir a demanda de água de uma produção de trigo no Canadá em 77% sem provocar a diminuição da produção. Esse trabalho foi laborioso, pois exigiu muitas simulações no *software AquaCrop* para obter a série diária de demanda de irrigação que maximiza a produção. Assim, caso se utilizasse essa metodologia para estimar a demanda que seria utilizada no dimensionamento do SAAC, seria necessário o investimento de muito tempo.

Portanto, os trabalhos que auxiliem na alocação dos eventos de irrigação com vistas a maximizar a produção por safra de culturas por meio de modelos de simulação de culturas trazem grande contribuição. Com isso, torna-se mais rápido o dimensionamento e otimização do SAAC para atender à irrigação com déficit hídrico. Esses sistemas proporcionam o armazenamento de água de chuva para que possa ser utilizada no período de estiagem, assim se diminui o risco de perda da produção por conta

dos aspectos hídricos, contribuindo para o aumento da garantia da produção da agricultura familiar.

OBJETIVOS

Objetivo geral

Desenvolver um modelo de dimensionamento e otimização de SAAC para atender não apenas à irrigação suplementar com déficit hídrico, mas também à demanda hídrica da criação de animais aplicado no semiárido.

Objetivos específicos

- Apresentar uma metodologia para verificar a Eficiência de Atendimento do SAAC no suprimento da demanda da irrigação suplementar com déficit de água, objetivando a maximização do rendimento da produção por volume hídrico aplicado;
- Demonstrar essa metodologia para o cultivo simulado do tomate na região de Feira de Santana – Bahia, cuja as demandas hídricas são atendidas por uma cisternas-calçadão com dimensões estabelecidas pelo P1+2;
- Determinar a combinação ótima de volume do reservatório e da área de captação para atender à demanda agrícola da cebola;
- Apresentar a versão aprimorada de uma ferramenta computacional para auxiliar o dimensionamento dos sistemas de chuva e no estudo da viabilidade financeira da sua implementação.

ESTRUTURA

Esta dissertação é composta por cinco capítulos, sendo que o primeiro aborda uma introdução geral sobre o tema, trazendo o contexto geral do semiárido e do dimensionamento do SAAC, buscando justificar a escolha dos objetivos gerais e específicos. O quinto expõe as conclusões gerais desta pesquisa, propondo possíveis linhas de pesquisas para trabalhos futuros. Os outros três capítulos são apresentados na forma de artigo e abordam os seguintes temas:

Capítulo 2 – Proposta de uma metodologia para verificação da Eficiência de Atendimento de uma cisterna-calçadão no suprimento da demanda de irrigação suplementar com déficit hídrico, considerando a água como recurso mais escasso. Essa metodologia é demonstrada para o cultivo simulado do tomate na região semiárida brasileira de Feira de Santana – Bahia.

Capítulo 3 – Realização de uma revisão bibliométrica a respeito do dimensionamento otimizado do SAAC em localidades semiáridas e exibição de uma metodologia para realizar essa etapa, considerando a demanda não apenas da irrigação suplementar com déficit controlado, mas também da dessedentação de animais. Essa metodologia foi aplicada para o cultivo da cebola e para a criação de cabras na mesma região;

Capítulo 4 – Apresentação de uma versão atualizada ferramenta computacional TOROH, cujo desenvolvimento teve início com o trabalho de Giffoni (2019) para dessedentação animal. Nessa ferramenta são implementadas as metodologias de análise, de projeto, de otimização do sistema, exibidas nos capítulos 2 e 3, e rotinas para permitir a verificação da viabilidade financeira. Também são apresentados três estudos de caso, considerando a demanda da pecuária, a agrícola e a soma das duas na região de Feira de Santana.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C.; BEBÉ, F.; LIMA, P.; SILVA, M.; FREITAS, P. Cenário da agricultura familiar em comunidades quilombolas do Território Sertão Produtivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA, 10, 2017, Brasília. **Anais [...]** Brasília: Aba, 2017. v. 13, p. 1-7.

ARAUJO, H.; SANTOS, B. A. **Agropecuária sustentável na Caatinga em 6 pontos**. 2021. Disponível em: <https://encurtador.com.br/aeBFQ>. Acesso em: 06 maio 2021.

ARAUJO, J. F.; COHIM, E. Determinação do Tamanho Ótimo dos Reservatórios de Água Pluvial em Araci na Bahia. **XIII Simpósio De Recursos Hídricos Do Nordeste**. Aracajú -SE, 2016.

ARAÚJO, S. M. S de. A região semiárida do Nordeste do Brasil: questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. **Rios Eletrônica- Revista Científica da FASETE**, v. 5, n. 5, p. 88-98, 2011.

ASA - ARTICULAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. **Ações – P1+2**. Disponível em: https://www.asabrasil.org.br/acoes/p1-2#categoria_img. Acesso em: 04 mar. 2021b.

BAPTISTA, N.; CAMPOS, C. H. **Caracterização do Semiárido brasileiro**. 2014. Disponível em: caracterizacao-do-semiarido-brasileiro. Acesso em: 09 jun. 2021.

BRASIL. Conselho Deliberativo da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Resolução nº 150 de 13 de dezembro de 2021. Aprova a Proposição n. 151/2021, que trata do Relatório Técnico que apresenta os resultados da revisão da delimitação do Semiárido 2021, inclusive os critérios técnicos e científicos, a relação de municípios habilitados, e da regra de transição para municípios excluídos. **Diário Oficial da União**, seção 1, n. 246, 2021.

BRITO, F. C. da S.; LIMA, D. C.; SOUSA, J. D.; MEDEIROS, A. C.; MARACAÇA, P. B.; MEDEIROS, A. P.; PAIVA, A. C. C. Uma abordagem histórica e teórica das políticas públicas de combate à seca e convivência com o semiárido. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, Pombal, v. 11, n. 1, p. 57-65, 2017.

BRITO, L. T. de L.; ARAÚJO, J. O. de; CAVALCANTI, N. de B.; SILVA, M. J. da. Água de chuva armazenada em cisterna produz frutas e hortaliças para o consumo pelas famílias rurais: estudo de caso. In: simpósio brasileiro de captação e manejo de água de chuva, 8. 2012, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: Sbcmac, 2012. p. 1-6.

BURITI, C. de O.; BARBOSA, H. A. Secas e vulnerabilidade socioambiental no semiárido brasileiro: a institucionalização dos estudos científicos e das políticas hídricas na região. **Ciência Geográfica**, Baruaru, v. 23, p. 267-282, 2019.

CAMPISANO, A.; MODICA, C. Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 63, p. 9-16, 2012.

- CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, p. 61-82, 2008.
- COELHO, E. F.; SILVA, T. S. M. da; PARIZOTTO, I.; SILVA, A. J. P. da; SANTOS, D. B. dos. **Sistemas de irrigação para agricultura familiar**. Cruz das Almas: Embrapa, 2012. 7 p.
- COELHO, E. F.; SANTOS, M. R.; DONATO, S. L. R.; REIS, J. B. R. da S.; CASTRICINI, A. Produção e eficiência de uso da água em cultivares de bananeira sob irrigação com déficit controlado. **Irriga**, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 94-110, 31 mar. 2021.
- COHIM, E.; ORRICO, S. R. M. A confiabilidade do volume das cisternas da zona rural para reservar água de chuva. **Revista GESTA**, [s. l.], v. D, 2015 p. 91–99.
- EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Convivência com a Seca no Semiárido**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/portfolio/convivencia-com-a-seca-no-semiarido>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- FRIZZONE, J. A. Planejamento da Irrigação com Uso de Técnicas de otimização. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 1, n. 1, p. 24-49, 2007.
- FRIZZONE, J.A. **Irrigação e Drenagem**. Departamento de Engenharia de Biosistemas, ESALQ/USP, Piracicaba, 2010.
- GHISI, E. Parameters Influencing the Sizing of Rainwater Tanks for Use in Houses. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 24, n. 10, p. 2381–2403, 2010.
- GIFFONI, V. V. **Otimização do sistema de captação e armazenamento de água de chuva no semiárido baiano**. 2019. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2019.
- GIFFONI, V. V. ; GADEA, A. ; COHIM, E. ; FREITAS, J. J. ; ARAUJO, J. Sizing of rainwater harvesting systems for animal watering in semiarid region. **Water Practice And Technology**, 2019.
- MALVEZZI, R. **Semi-Árido - Uma visão Holística**. 140p. (Pensar Brasil) Brasília: CONFEA, 2007.
- OWEIS, T. Y.; HACHUM, A. Improving Water Productivity in the Dry Areas of West Asia and North Africa. **Water Productivity in Agriculture: Limits Opportunities for Improvement**, CABI Publishing: Wallingford, UK, 2003; p. 179–198.
- QADIR, M.; SHARMA, B. R.; BRUGGEMAN, A.; CHOUKR-ALLAH, R.; KARAJEH, F. Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries. **Agriculture Water Management**. 2007.

SÁNCHEZ, A. S.; COHIM, E; KALID, R. A. A Review on Physicochemical and Microbiological Contamination of Roof-Harvested Rainwater in Urban Areas. **Sustainability of Water Quality and Ecology**, v. 6, p. 119-137, 2015.

SANTANA, A. C. A. de. **Avaliação do gerenciamento da cisterna calçadão, enquanto tecnologia ambiental utilizada por família de agricultores no semiárido pernambucano**. 2015. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2015.

SILVA, R. M. A. da. Entre dois paradigmas: combate à seca e convivência com o semi-árido. **Sociedade e Estudo**, Brasília, v. 18, n. 1, p. 361-385, 2003.

SILVA, V. N. D.; DOMINGOS, P. Captação e manejo de água de chuva. **Saúde & Ambiente em Revista**, v.2, n.1, p. 68-76, 2007.

SMILOVIC, M.; GLEESON, T.; ADAMOWSKI, J.; LANGHORN, C. More food with less water—Optimizing agricultural water use. **Advances in Water Resources**, 2019, p. 256-261.

TOYOSUMI, I. da S. AMORIM, M. da S.; LOPES, W. do A.; COSTA, M. G. C.; COELHO FILHO, M. A. Produção de frutos de laranjeira ‘Pêra’ enxertada em limoeiro ‘Cravo’ sob diferentes manejos de irrigação no litoral norte da Bahia. In: JORNADA CIENTÍFICA, 11., 2017, Cruz das Almas. **Anais [...]**. Cruz das Almas: Embrapa, 2017. p. 85-85.

**CAPÍTULO 2 – O PAPEL DA CISTERNA-CALÇADÃO NO ATENDIMENTO DA
IRRIGAÇÃO COM DEFICIT HÍDRICO EM REGIÕES SEMIÁRIDAS**

O PAPEL DA CISTERNA-CALÇADÃO NO ATENDIMENTO DA IRRIGAÇÃO COM DEFICIT HÍDRICO EM REGIÕES SEMIÁRIDAS

Juliana Farias Araujo^a, Anderson de Souza Matos Gadea^a, Ana Caroline Bastos Lima de Souza^a, Maria Auxiliadora Freitas dos Santos^b, Eduardo Cohim^a

a Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Avenida Transnordestina, Feira de Santana, Bahia, 44036-900, Brasil

b Instituto Federal Baiano, Ciência e Tecnologia, Rua Vicinal de Aparecida, s/n, Aparecida, Serrinha, Bahia, 48700-000, Brasil

Resumo

O semiárido brasileiro apresenta baixa oferta hídrica devido à concentração de chuvas em curtos períodos e à baixa capacidade de armazenamento por conta do embasamento geológico cristalino predominante. O armazenamento de água da chuva em cisternas para uso produtivo faz parte de um programa local que objetiva possibilitar a convivência com o abastecimento irregular de água. No entanto, os resultados ficaram aquém das expectativas devido à falta de recursos tecnológicos para proporcionar um melhor desempenho. Assim, neste trabalho é proposta uma metodologia para verificar o potencial das cisternas-calçadão utilizando o conceito de irrigação deficitária para maximizar a produtividade da água. Uma estratégia de irrigação denominada Técnica Evolutiva Global para Programação Ótima de Irrigação (GET-OPTIS) disponível no *Deficit Irrigation Toolbox* (DIT) foi usada para gerar a demanda agrícola para as culturas, a qual foi utilizada na verificação da Eficiência de Atendimento (EA) do sistema de captação e armazenamento de água de chuva baseado no balanço hídrico seriado com intervalo diário. Esse método foi testado para modelar o desempenho da cisterna calçadão no suprimento da demanda da cultura do tomate na região de Feira de Santana - BA. Os resultados mostraram que é possível obter uma safra anual com EA confiável, mesmo em anos considerados extremamente secos, e com produtividade hídrica média de $15,4 \text{ kg.m}^{-3}$. O emprego generalizado de um sistema de irrigação de 2.500 m^2 para atender cerca de 1,5 milhão de famílias agricultoras do semiárido brasileiro permitiria uma irrigação eficiente de 360 mil hectares, área 350% maior que a irrigação convencional na região, reduzindo a pegada hídrica em 64% ao ano.

Palavras-chave: Produtividade hídrica. Escassez hídrica. Convivência com o semiárido. Modelo de crescimento da cultura.

Abstract

The Brazilian semiarid region has a low water supply capacity due to the concentration of rainfall in short periods and a low storage capacity due to a predominant geological crystalline basement. Rainwater storage in cisterns for productive use is part of a local program that aims to enable coexistence with irregular water supply. However, the outcomes have fallen short of expectations due to the lack of technological resources to provide better performance. Here, we propose a methodology to explore the potential of boardwalk cisterns using the concept of deficit irrigation to maximize water productivity in this context. An irrigation strategy called Global Evolutionary Technique for OPTimal Irrigation Scheduling (GET-OPTIS) of the Deficit Irrigation Toolbox (DIT) was used to generate the agricultural demand for the crops. The daily demand was used in the sizing

of the capture and storage system based on serial balance. This method was tested to model the performance of tomato crops in the city of Feira de Santana. Results showed that it is possible to obtain an annual crop with reliable level of guarantee, even in years considered extremely dry, and with average water productivity of 15.4 kg.m^{-3} . The widespread employment of an irrigating system that covers $2,500 \text{ m}^2$ to serve some 1.5 million farming families in the Brazilian semiarid would enable efficient irrigation of 360,000 hectares, which is 3.5 the area of conventional irrigation in the region, reducing the water footprint by 64 %.

Keywords: Water productivity. Water scarcity. Coexistence with the semiarid. Culture growth model.

2.1 INTRODUÇÃO

Regiões semiáridas podem ser caracterizadas como locais que apresentam Índice de Aridez entre 0,20 e 0,50 e chuvas anuais superiores a 200 e inferiores a 700 mm (LAL, 2004; GALLART *et al.*, 2002). Também costumam ter uma relação entre evaporação e precipitação superior a 1,0, o que contribui para o déficit hídrico (LU *et al.*, 2018).

No Brasil, esse enquadramento é mais amplo, pois é exigido o cumprimento de apenas um destes atributos: precipitação anual igual ou inferior a 800 mm, Índice de Aridez de *Thorntwaite* igual ou inferior a 0,50 ou percentual de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano (BRASIL, 2021). Essa restrição impacta negativamente a produção agrícola, principalmente a praticada por agricultores familiares, que, em sua maioria, possuem área inferior a dez hectares e são dependentes das condições climáticas e do trabalho manual, pois não têm fácil acesso à infraestrutura de irrigação e ao suporte técnico (SAMPAIO *et al.*, 2017; SINGHAL *et al.*, 2020).

Como consequência, as 1,5 milhão de famílias que vivem no semiárido se encontram entre as mais pobres do Brasil, com Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) raramente atingindo o valor de 0,5 (MELO, 2017). Considerando-se a impossibilidade de alterar essas características do clima regional, as políticas de “Convivência com o Semiárido” aparecem como uma alternativa para viabilizar a agricultura familiar sustentada. Esse paradigma busca promover o monitoramento, a adaptação e a mitigação das características impostas pelo clima, valorizando e conservando as potencialidades dos recursos naturais locais (BRITO *et al.*, 2017).

No Brasil, o Programa “Uma Terra e Duas Águas” (P1+2) coopera com esse paradigma, ao incentivar a construção de sistemas de aproveitamento de água de chuva (SAACs). Exemplos deles são as barragens subterrâneas, os tanques de pedra ou caldeirão, as barraginhas, os barreiros-trincheiras e as cisternas-calçadão. Essas últimas são formadas por uma cisterna (52 m^3) que armazena água de chuva captada por meio de

uma área de captação (200 m²) do tipo calçadão pavimentado. Essa fonte hídrica apresenta boa qualidade decorrente do processo de destilação natural relacionado ao ciclo hidrológico e pode ser utilizada nos períodos de estiagem para suprir a demanda da agricultura e da pecuária familiar (SÁNCHEZ; COHIM; KALID, 2015).

A literatura relacionada mostrou que as cisternas-calçadão são bem aceitas pelos usuários, principalmente por conta do conseqüente aumento da produção agrícola provocado por sua implementação, e que resultados ainda melhores têm sido relatados quando utilizado em associação com sistemas de irrigação (CAVALACANTE; MESQUITA; RODRIGUES-FILHO, 2021; SILVA *et al.*, 2021). Dessa forma, além de considerar os aspectos relacionados com o abastecimento hídrico, é importante incentivar as técnicas de irrigação, principalmente no contexto de uso frugal da água, como a irrigação suplementar com deficit hídrico, empregando uma série de lâminas diárias que maximizam a produtividade da água ao invés da produtividade das culturas.

Ressalta-se que as pesquisas sobre o potencial de SAACs no atendimento da irrigação geralmente consideram o atendimento das demandas totais das culturas (GRIS *et al.*, 2017; JING *et al.*, 2017; MINATTO, 2013), ao invés de utilizar uma abordagem que busca maximizar os rendimentos por volume de água aplicado, o que é um aspecto importante na avaliação para regiões semiáridas. Nesse contexto, a modelagem colabora com o planejamento da irrigação suplementar com deficit, permitindo comparar cenários e melhorar a gestão de recursos na agricultura, considerando as especificidades das culturas e as características hidrológicas (WANG; GUO; GUO, 2022).

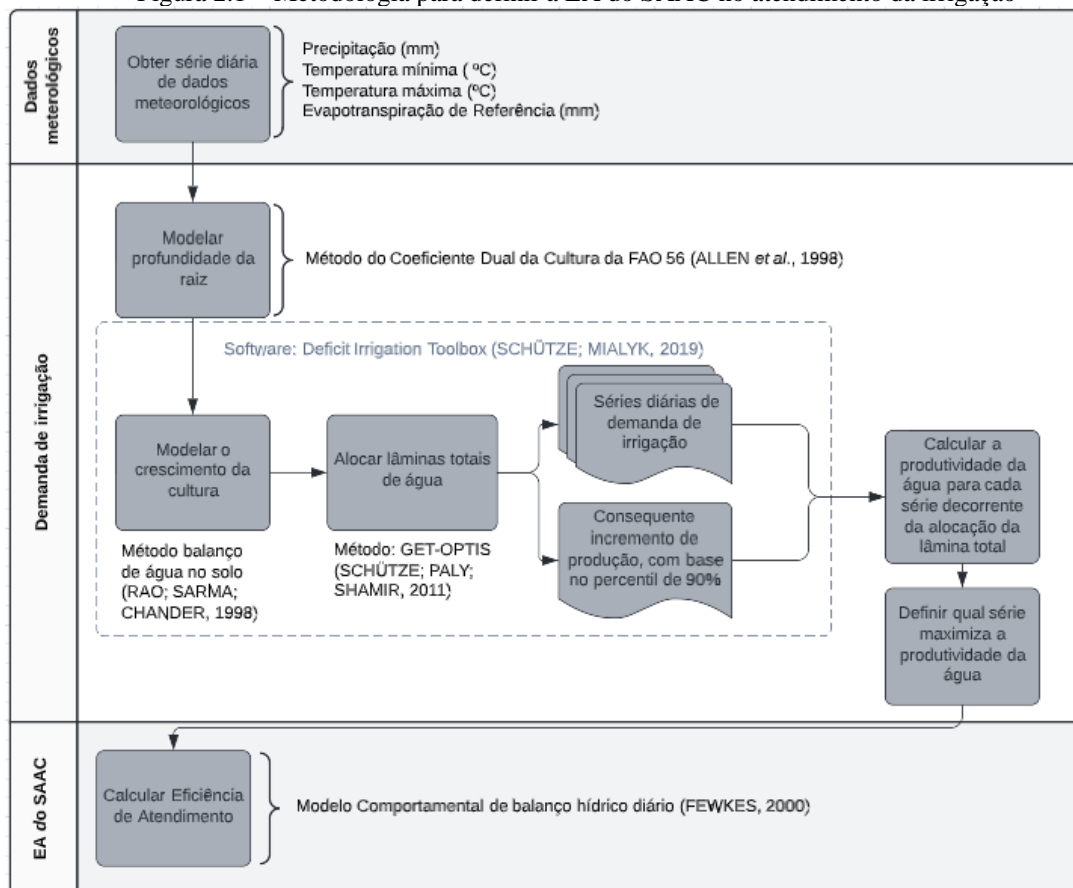
Desse modo, este trabalho teve como objetivo propor uma metodologia para avaliar a Eficiência de Atendimento das cisternas-calçadão no atendimento da demanda de irrigação no semiárido, com foco na produtividade hídrica. A metodologia foi utilizada em um estudo de caso em Feira de Santana – Bahia – Brasil.

2.2 METODOLOGIA

O desempenho da cisterna-calçadão pode ser verificado pela sua Eficiência de Atendimento (EA), que indica a parcela da demanda que é suprida pela água armazenada. A metodologia proposta para calcular a EA segue as seguintes etapas (Figura 2.1): (i) coletar dados climáticos da região (precipitação, temperatura, evapotranspiração); (ii) definir a cultura e modelar a profundidade de raiz e o seu crescimento; (iii) alocar temporal e quantitativamente as lâminas totais de irrigação, com objetivo de maximizar o rendimento agrícola, gerando uma série de demanda diária para cada lâmina total; (iv)

escolher a série que maximiza a produtividade da água; (v) Calcular a EA utilizando as equações do modelo de balanço hídrico seriado propostas por Fewkes (2000). Essa metodologia pode ser aplicada para qualquer localidade, para diversas culturas agrícolas e para todas combinações de área de captação e de volume de cisterna.

Figura 2.1 – Metodologia para definir a EA do SAAC no atendimento da irrigação



2.2.1 DEMANDA DE IRRIGAÇÃO

A demanda diária de água foi estimada utilizando a estratégia de irrigação denominada Técnica Evolutiva Global para Programação Ótima de Irrigação (GET-OPTIS), incluída no *software Deficit Irrigation Toolbox* (DIT) (SCHUTZ; MIALYK, 2019). Essa estratégia aplica algoritmos de otimização evolutiva para alocar temporal e quantitativamente a lâmina total de irrigação, gerando a série de demanda diária de irrigação que maximiza a produção (SCHUTZ; PALY; SHAMIR, 2011).

Os dados de entrada para o GET-OPTIS incluem a série de profundidade da raiz da cultura, que é usado para calcular o balanço hídrico do solo (RAO; SARMA; CHANDER, 1998). Neste estudo, essa profundidade foi modelada conforme o Método do Coeficiente Dual da cultura da FAO 56 (ALLEN *et al.*, 1998).

A etapa da alocação é repetida para diversas lâminas totais, variando de 0 mm à correspondente a da irrigação suplementar total, gerando uma série de demanda diária para cada lâmina total. A escolha da que será utilizada na verificação da EA do SAAC é realizada com auxílio da produtividade hídrica, que é calculada por meio da Equação 2.1.

$$PA = \frac{Pr}{P+I} \quad (2.1)$$

Em que: PA é a produtividade da água (kg.m^{-3}); Pr, a produção atingida pela cultura (kg), P, a precipitação total (m^3) e I, o volume de irrigação (m^3).

2.2.2 VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE ATENDIMENTO DA CISTERNA-CALÇADÃO

O compartimento da água nos SAACs ao longo do tempo foi simulado por meio das Equações 2.2, 2.3 e 2.4 (FEWKES, 2000).

$$Q_{(t)} = P_{(t)} \times A \times C \quad (2.2)$$

$$Y_{(t)} = \min \left\{ \begin{array}{l} D_{(t)} \\ V_{(t-1)} + \theta Q_{(t)} \end{array} \right. \quad (2.3)$$

$$V_{(t)} = \min \left\{ \begin{array}{l} V_{(t-1)} + Q_{(t)} - Y_{(t)} \\ R - (1 - \theta)Y_{(t)} \end{array} \right. \quad (2.4)$$

Em que: $Q_{(t)}$ refere-se à quantidade de água que flui diariamente para o reservatório (L); $P_{(t)}$, à precipitação diária (mm); A, à área de captação (m^2), C é o coeficiente de escoamento superficial (adotado como 0,8); $Y_{(t)}$ é o volume de água utilizado para suprir a demanda (L); θ é um coeficiente adimensional que varia de 0 a 1 e (adotado como 0,5, com o intuito de abordar uma situação intermediária); $D_{(t)}$ refere-se à demanda diária (L); $V_{(t)}$ é o volume armazenado no reservatório (L), R é a capacidade do reservatório (L).

A Equação 2.5 permite realizar a conversão das demandas diárias de irrigação (em milímetros) em volume (em litros).

$$D_{(t)} = \frac{0,4 \times A \times \text{IRN}}{\text{Efi}} \quad (2.5)$$

Em que: A corresponde à área irrigada (m^2); IRN, à irrigação total necessária (mm); Efi, à eficiência de aplicação (%), adotada como 90% por estar sendo simulada a irrigação por

gotejamento (FERREIRA, 2011). A constante 0,4 representa a fração mínima de área molhada recomendada para as condições semiáridas (EMBRAPA, 2009).

A EA da cisterna pode ser calculada por meio da Equação 2.6.

$$EA (\%) = \frac{\sum Y_{(t)}}{\sum D_{(t)}} 100 \quad (2.6)$$

2.2.3 ESTUDO DE CASO: CULTIVO DO TOMATE EM FEIRA DE SANTANA

A metodologia proposta foi aplicada para a simulação do cultivo do tomate em uma área de plantio de 2.500 m² na zona rural de Feira de Santana (Bahia), localizada no semiárido brasileiro. Os períodos de plantio das principais culturas da região geralmente começam entre maio e julho, meses de maior precipitação e temperaturas mais baixas (SANTOS; MARTINS; SANTOS, 2018). Portanto, a data de plantio foi simulada para iniciar no primeiro dia de maio.

2.2.3.1 Série de dados meteorológicos

A série histórica dos dados diários de temperatura (mínima e máxima), precipitação e de evapotranspiração de referência (ET₀) dessa cidade foi obtida no Instituto Nacional de Meteorologia para o período de 20 anos (1998-2017) (INMET, 2018). As falhas foram preenchidas da seguinte maneira: dados de ET₀ com a série calculada automaticamente no *AquaCrop* (FAO, 2021) e os de temperatura e de precipitação com os valores disponibilizados por Xavier, King e Scalon (2016). A série sem falhas apresenta precipitação média anual de 705 mm, evapotranspiração potencial média anual de 1.159 mm, temperatura mínima média anual de 20 °C e máxima de 30 °C.

2.2.3.2 Modelagem do crescimento da cultura

Dados da literatura foram utilizados para estimar os parâmetros do modelo de crescimento da profundidade da raiz e para calibrar o *software* DIT (Tabela 2.1). Foram utilizadas oito lâminas totais de irrigação (20, 40, 60, 80, 100, 150, 200 e 250) mm , considerando um cenário de irrigação suplementar com déficit hídrico. Dois outros cenários foram simulados: sem irrigação, ou seja, produção de sequeiro – precipitação como única fonte de água para as culturas – e irrigação suplementar total – assumindo disponibilidade ilimitada de água para irrigação e a aplicação de água sempre que a umidade do solo for inferior a 90% da capacidade de campo.

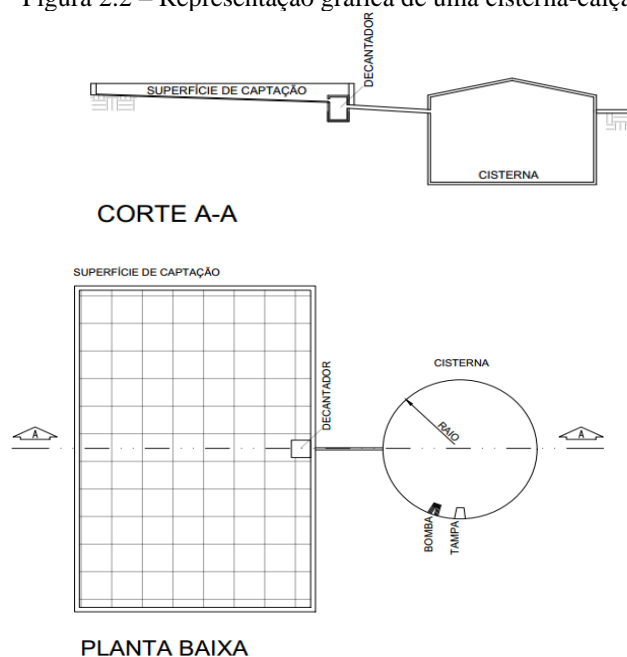
Tabela 2.1 – Dados necessários para calibrar o DIT e para modelar a profundidade da raiz

Característica	Valor	Unidade	Fonte
Altura máxima da planta - tomate	0,6	m	Allen <i>et al.</i> (1998)
Capacidade de Campo e Ponto de Murcha Permanente (Textura franco-arenosa)	22; 10	%	Raes (2017)
Coefficiente basal inicial e médio - tomate	0,15; 1,1	-	Allen <i>et al.</i> (1998)
Coefficientes da cultura - tomate	0,40; 0,75; 1,11; 0,93	-	Freitas (2018)
Duração das fases fenológicas - tomate	6; 26; 33; 24	Dia	Freitas (2018)
Produtividade máxima - tomate	55	T.ha ⁻¹	Doorenbos e Kassam (1979)
Profundidade inicial da sementeira - tomate	4	cm	Freitas (2018)
Profundidade máxima efetiva - tomate	1,1	m	Allen <i>et al.</i> (1998)

2.2.3.3 Análise do desempenho da cisterna-calçadão

Foi avaliada a EA da cisterna-calçadão com volume de 52 mil litros e uma área de captação, do tipo calçadão pavimentado, de 200 m² (Figura 2.2). Essas dimensões são estabelecidas pelo Programa nacional Uma Terra e Duas Águas (P1+2), que objetiva a construção de SAACs para suprir a demanda da agricultura e da pecuária familiar no semiárido brasileiro.

Figura 2.2 – Representação gráfica de uma cisterna-calçadão



Fonte: Giffoni *et al.* (2019)

Considerando que a EA reflete o desempenho global para o período simulado, também foi analisado o desempenho do sistema para cada ano da série, levando em conta o Número de Dias Consecutivos sem Chuvas ao longo do ano (NDCSC), número de dias

chuvosos (NDC) e coeficiente de variação das chuvas (CV). Os dias com chuva foram considerados como aqueles em que a precipitação foi igual ou superior a um milímetro. Também foi calculado o Índice de Anomalia de Chuva (IAC) (VAN-ROOY, 1965) por meio da Equação 2.7 (anomalias positivas) e da Equação 2.8 (anomalias negativas). Utilizou-se a classificação de Araújo, Moraes Neto e Sousa (2009) para caracterizar a severidade dos períodos secos e chuvosos baseado no IAC.

$$IAC = 3 \times \left(\frac{N - \bar{N}}{M - \bar{N}} \right) \quad (2.7)$$

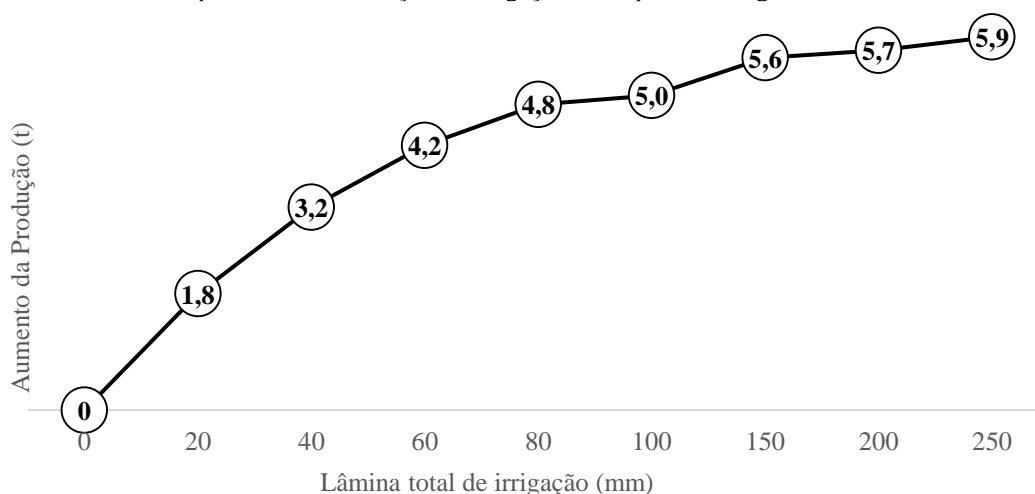
$$IAC = -3 \times \left(\frac{N - \bar{N}}{\bar{X} - \bar{N}} \right) \quad (2.8)$$

Em que: N corresponde à precipitação anual de cada ano (mm), \bar{N} , à média anual de toda a série histórica (mm), \bar{X} , à média das dez menores precipitações anuais da série (mm) e M, à média das dez maiores precipitações.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações mostram uma produção máxima de 6 toneladas de tomate considerando uma área plantada de 2.500 m² sem irrigação (água somente da precipitação). A Figura 2.3 exibe os incrementos obtidos com a aplicação das séries diárias de irrigação suplementar decorrentes da alocação quantitativa e temporal dos eventos de rega em comparação com o cenário de sequeiro.

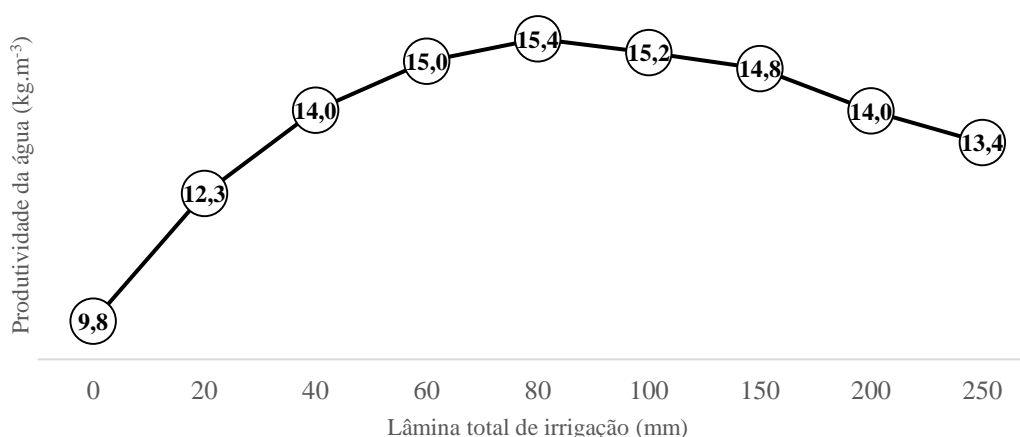
Figura 2.3 – Incremento na produção do tomate, em uma área de cultivo de 2.500 m², em função da lâmina total comparada com a situação da irrigação de sequeiro na região de Feira de Santana



Esses incrementos diminuem com o aumento da lâmina total. Esse mesmo comportamento foi evidenciado por Orduña-Alegria, Schütze e Niyogi (2019) quando analisaram o cultivo do milho nos Estados Unidos. Assim, utilizou-se a produtividade da água (Figura 2.4) para auxiliar na escolha da série de demanda diária de irrigação que será utilizada na verificação da EA da cisterna-calçadão no suprimento dessa demanda, buscando sempre maximizar a água ao invés da produtividade das culturas.

A série de aplicações diárias decorrente da alocação da lâmina de 80 mm é a que maximiza a produtividade da água ($15,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), possibilitando o aumento da produção simulada em 4,8 toneladas (80%) em relação ao sistema de sequeiro.

Figura 2.4 – Produtividade da água em função da lâmina total no cultivo do tomate na região de Feira de Santana



O cenário com acesso ilimitado à água para irrigação apresentou a produção máxima com a lâmina de irrigação correspondente a 221 mm, resultando em um rendimento adicional de 7,3 toneladas em relação ao sistema não irrigado. No entanto, isso representaria 157 m^3 (Equação 2.5) a mais de água demandada do que o cenário de irrigação com deficit hídrico, o que é crítico em um cenário em que se visa aumentar a eficiência agrícola no semiárido.

Esse valor poupado ($157 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}$) pode ser utilizado para variar a produção agrícola ou para atender ao consumo anual de 172 cabras, considerando a demanda per capita diária de $5\text{L}\cdot\text{dia}^{-1}$ e o período de crescimento de seis meses (IABS, 2011). Sun *et al.* (2022) verificaram uma economia ainda maior, em que seus resultados experimentais mostraram que se pode aumentar a produção de maçã em $550 \text{ toneladas}\cdot\text{ano}^{-1}$ em uma área de $1,22\cdot 10^7 \text{ m}^2$ na China, possibilitando economizar cerca de 15.000 m^3 de água e elevar a produtividade hídrica em 33,4%.

Embora a irrigação suplementar com déficit hídrico possibilite reduzir o consumo de água, ainda não é possível atender a essa demanda durante todo o ano no semiárido brasileiro por conta da disponibilidade limitada de recursos hídricos na estiagem decorrente da concentração das chuvas em quatro meses no ano e na baixa capacidade de armazenamento de água no solo (ANDRADE *et al.*, 2017).

Nesse contexto, as cisternas-calçadão se destacam como uma das principais soluções para o armazenamento da água da chuva nos períodos de estiagem, minimizando a perda de transpiração por conta da vedação da cobertura. Ademais, seu uso combinado com sistemas de irrigação tem o potencial de minimizar a salinização do solo, pois elas armazenam água com baixo teor de sal, ao contrário da armazenada em tanques abertos.

Nesse contexto, a cisterna do calçadão do programa P1+2 aqui avaliada apresentou uma EA de 92% no período simulado de 20 anos para uma lâmina total de irrigação de 80 mm . Valores elevados de EA também foram observados na análise anual (Tabela 2.2), permanecendo acima de 70% mesmo para anos considerados extremamente secos (por exemplo, 2017). Esses valores são considerados adequados tomando de acordo com a garantia mínima para a irrigação de 50 a 75% recomendada pelo Ministério da Agricultura da China (ZHU *et al.*, 2015).

Tabela 2.2 – Parâmetros da precipitação e EA das cisternas-calçadão na região de Feira de Santana

ANO	P (mm)	IAC	Classificação IAC	NDC	CV	NDCSC	EA (%)
1999	882	5,15	Extremamente chuvoso	107	2,8	28	96,7
2000	874	4,91	Extremamente chuvoso	110	2,9	28	100,0
2010	851	4,23	Extremamente chuvoso	106	2,8	27	86,9
2003	824	3,45	Muito chuvoso	122	2,4	21	100,0
2008	792	2,52	Muito chuvoso	105	3,1	30	89,2
2011	788	2,40	Muito chuvoso	87	3,7	26	80,1
2005	784	2,29	Muito chuvoso	107	3,4	30	100,0
2004	774	2,01	Muito chuvoso	71	3,6	40	90,2
2007	772	1,94	Chuvoso	103	3,6	21	100,0
2006	743	1,09	Chuvoso	95	2,8	48	97,1
2013	732	0,78	Chuvoso	104	3,0	38	91,8
1998	711	0,19	Chuvoso	109	2,7	18	80,0
2014	670	-1,00	Seco	112	2,7	18	96,0
2015	649	-1,64	Seco	99	3,1	43	100,0
2002	645	-1,75	Seco	87	3,1	32	97,3
2001	619	-2,49	Muito seco	88	2,6	35	87,7
2016	608	-2,81	Muito seco	83	3,4	26	86,3
2009	580	-3,64	Muito seco	73	3,2	29	100,0

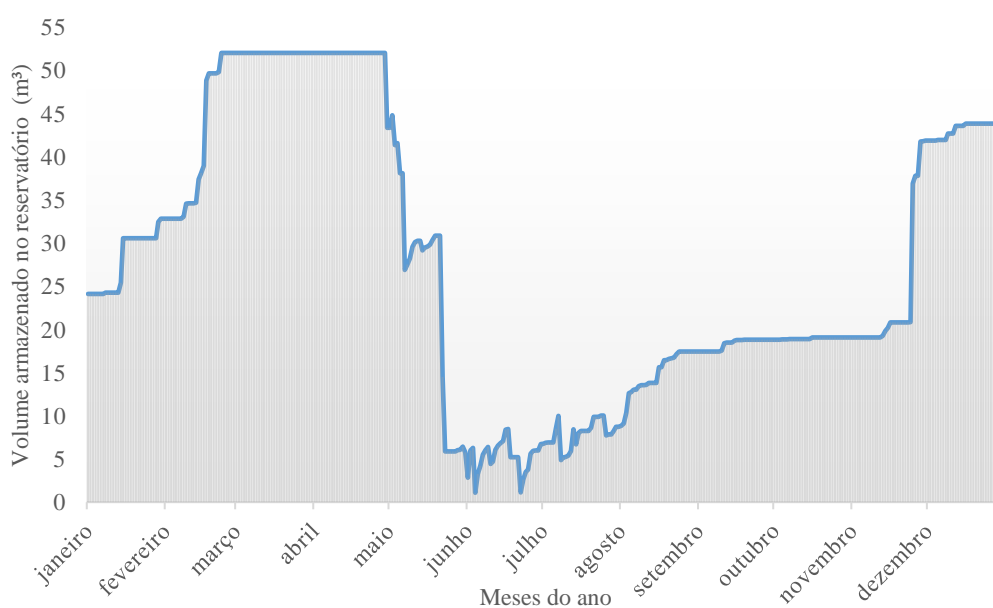
2017	429	-8,01	Extremamente seco	92	2,5	58	70,5
2012	373	-9,64	Extremamente seco	82	3,5	25	84,4

P – Precipitação média anual, IAC – Índice de Anomalia de Chuva, NDC – Número de Dias Chuvosos, CV – Coeficiente de Variação, NDCSC – Número de Dias Consecutivos sem Chuvas; EA – Eficiência de Atendimento.

Assim, os SAACs apresentam potencial para melhorar consideravelmente as condições de vida das famílias de agricultores familiares que residem em localidades semiáridas, pois eles permitem elevar a receita bruta em R\$ 21.000 (U\$ 4.348, considerando a taxa de câmbio de maio de 2022), considerando o incremento da produção de 4,8 toneladas e o preço de mercado de R\$ 4,30 (U\$0,90) por quilo do tomate, mas que poderia ser de qualquer outra cultura. Para isso, deve ser realizado o planejamento da irrigação para maximizar os benefícios obtidos provocados por conta da água armazenada e incentivado o plantio na época indicada, correspondente ao período mais chuvoso e de evapotranspiração mais baixa, o uso de culturas de ciclo curto – quatro a cinco meses no máximo –, adubação orgânica e uso de defensivos naturais.

Identificar o “melhor uso da água armazenada” pode potencializar esses benefícios, uma vez que, na simulação realizada é exibido um excedente de água não utilizado no período de cultivo (Figura 2.5). Assim, os SAACs também poderiam ser utilizados para a dessedentação de pequenos animais, como cabras ou galinhas, para o cultivo de hortas e para o suprimento doméstico, durante os outros meses do ano.

Figura 2.5 – Volume de água simulado disponível na cisterna, considerando a demanda do tomate na região de Feira de Santana



Outro ponto a ser observado é que, com a área de captação como 200 m², é possível atingir a EA de 90% no atendimento da demanda do tomate, com um volume de cisterna de 11,1 m³, que é um valor muito inferior aos 52 m³ adotado pelo P1+2. Assim, apesar de se justificar a necessidade de alguma padronização nas políticas públicas, destaca-se a importância da realização do dimensionamento do SAAC individualizado ou de se adotar valores escalonados que levem em conta as demandas e os fatores regionais como precipitação e evaporação, já que pode representar uma redução de custos e racionalização no uso de materiais.

Além de os SAACs promoverem o atendimento da demanda da irrigação suplementar com déficit hídrico com maior segurança no contexto de uma única família no semiárido, o seu uso disseminado tem potencial para reduzir a demanda por infraestrutura centralizada de abastecimento de água, os impactos causados por elas e a exploração de águas subterrâneas e superficiais. Isso se torna crítico no contexto de ter sido observada a diminuição da superfície de água da Caatinga (bioma predominante) em 8,3%, ou seja, cerca de 800 km², no período de 1985 a 2020. Esse cenário tende a se agravar à medida que essa região semiárida vem ganhando destaque para a produção de alimentos, com projeção de crescimento em áreas irrigadas de mais de 76%, ou seja, cerca de 42.000 km² (ANA, 2021; MAPBIOMAS, 2021).

Caso todas as 1,44 milhão famílias residentes no semiárido construíssem uma cisterna-calçadão, haveria a redução da pegada hídrica em 64% e aumentaria a área de produção em 360.000 hectares, o que corresponde a 3,5 vezes a área irrigada pública, e é quase duas vezes maior que a expansão projetada em áreas irrigadas de quase 2.000 km² (ANA, 2021). Isso poderia incentivar ainda mais a produção agrícola sustentável, deslocando atividades insustentáveis como a produção de lenha e carvão, principal causa do desmatamento da vegetação nativa da Caatinga que consumiu cerca de 100.000 km² de 1985 a 2020 (MAPBIOMAS, 2021).

Além disso, a inclusão dessa área na produção de alimentos não demandaria nenhuma água de corpos hídricos (água azul) colaborando com a manutenção das vazões ecológicas e preservando os sistemas hídricos e os serviços ecossistêmicos. Adicionalmente, reduziria a demanda de energia por conta da descentralização das áreas produtivas, com pequenas distâncias a serem percorridas pela água.

Do ponto de vista social, o incremento dessa área produtiva alavancaria a autonomia e a segurança alimentar e hídrica dos agricultores familiares e permitiria a diversidade da sua produção por conta da possibilidade de plantar alimentos que tenham

ciclos mais longos, não se restringindo apenas ao período das chuvas. Também reduziria os problemas decorrentes do êxodo rural, pois o acesso adicional à água possibilita a redução da necessidade de comprar alimentos e ainda permitiria o aumento da renda deles por conta da comercialização da produção excedente em mercados próximos. Nesse sentido, proporcionaria o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), principalmente no que se relaciona com a soberania alimentar (ODS 2) e com o aumento da renda desses agricultores (ODS 10) (ONU, 2019).

Os resultados encontrados por Fagundes *et al.* (2020) colaboram com a verificação desses potenciais benefícios, pois 97% dos agricultores familiares beneficiados com o P1+2 relataram melhoria na qualidade e na diversidade de alimentos produzidos. Além disso, 72,4% confirmaram o aumento de renda, o que mostra como as cisternas-calçadão permitiu promover a soberania alimentar, preservando a produção tradicional e as práticas alimentares.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi apresentada uma metodologia para possibilitar a análise da adequabilidade das cisternas-calçadão no atendimento da demanda da irrigação suplementar com déficit hídrico. A alocação quantitativa e temporal da lâmina total de irrigação e sua produtividade foram avaliadas para identificar o melhor uso da água em cada etapa.

O estudo de caso para o cultivo do tomate na região de Feira de Santana, localizada na região semiárida brasileira, mostrou que a aplicação série diária de demanda de irrigação decorrente da alocação da lâmina total de 80 mm resulta na produtividade máxima da água ($15,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) e no aumento da produção de 4,8 toneladas (80%) em uma área de 2.500 m^2 , quando comparada com a condição de sequeiro. Esse incremento é 34% inferior a produção que seria obtida com a suplementar total, a qual demandaria 177% a mais de água. A demanda da irrigação deficitária poderia ser atendida, com a EA global de 92%, ao longo dos 20 anos, por um sistema composto por cisterna de 52 m^3 e por uma área de captação de 200 m^2 .

A universalização desse sistema em todo o semiárido brasileiro teria potencial para aumentar a área de produção em 360 mil hectares, resultando em benefícios sociais e no uso mais eficiente da água. Outras implicações positivas seriam a redução da demanda por infraestrutura e energia para transportar grande volume de água em longas

distâncias e o aumento da garantia de colheita a geração de mais ocupação e renda para os agricultores familiares, fixando a população no campo e reduzindo os problemas sociais e econômicos decorrentes do êxodo rural.

Neste trabalho se utilizou o modelo de crescimento conhecido como balanço de água no solo. Por mais precisa que essa modelagem seja, não considera alguns fatores, como a ocorrência de pragas, que certamente influenciam a produção. Assim, recomenda-se para trabalhos futuros a realização de experimentos para ajustar os parâmetros, bem como para comprovar os resultados simulados. Também se sugere a etapa de dimensionamento dos sistemas de aproveitamento de água de chuva para verificar a possibilidade de se diminuir os custos de construção e para potencializar os benefícios decorrentes das cisternas em situações que demandam mais água.

2.5 AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa contou com o incentivo do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), que concederam, respectivamente, bolsas de Iniciação Científica (pedido nº 159878/2020-9) e de Mestrado (pedido nº 1204/2020). Os autores também agradecem a Samuel Alex Sipert e Adriano Souza Leão por suas contribuições durante a revisão do artigo.

REFERÊNCIAS

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas Irrigação 2021**: uso da água na agricultura irrigada. 2. ed. Brasília: Ana, 2021. 66 p.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998, 301p.

ANDRADE, E. M. de; AQUINO, D. do N.; CHAVES, L. C. G.; LOPES, F. B. Water as Capital and Its Uses in the Caatinga. In: SILVA, J. M. C. da; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. (ed.). **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**. [S.L.]: Spring, 2017. p. 281-302.

ARAÚJO, L. E; MORAES NETO, J. M.; SOUSA, F. A. S. Classification of annual rainfall and the rainy quarter of the year in the Paraíba river basin using Rain Anomaly Index (RAI). **Revista Ambiente e Água**, v.4, n. 3, p. 93-110, 2009.
<https://doi.org/10.4136/ambi-agua.105>

BRASIL. Conselho Deliberativo da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Resolução nº 150 de 13 de dezembro de 2021. Aprova a Proposição n. 151/2021, que trata do Relatório Técnico que apresenta os resultados da revisão da delimitação do

Semiárido 2021, inclusive os critérios técnicos e científicos, a relação de municípios habilitados, e da regra de transição para municípios excluídos. **Diário Oficial da União**, seção 1, n. 246, 2021.

BRITO, F. C. da S.; LIMA, D. C.; SOUSA, J. D.; MEDEIROS, A. C.; MARACAÇA, P. B.; MEDEIROS, A. P.; PAIVA, A. C. C. Uma abordagem histórica e teórica das políticas públicas de combate à seca e convivência com o semiárido. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, Pombal, v. 11, n. 1, p. 57-65, 2017.

CAVALACANTE, L.; MESQUITA, P. S.; RODRIGUES-FILHO, S. Cisternas de 2a Água: tecnologias sociais promovendo capacitação adaptativa às famílias de agricultores brasileiros. In: SABOURIN, E.; GOULET, L. M. R. O. F.; MARTINS, E. S. **A ação pública de adaptação da agricultura à mudança climática no Nordeste semiárido brasileiro**. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais Ltda, 2021. p. 123-142.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193p. Irrigation and Drainage Paper, 33.

EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema de Produção de Melancia**. 2009. Disponível em: <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Melancia/SistemaProducaoMelancia/irrigacao.htm>. Acesso em: 15 dez. 2021.

FAGUNDES, A. A.; SILVA, T.C.; VOCI, S. M.; SANTOS, F. dos; BARBOSA, K. B. F.; CORRÊA, A. M. S. Food and nutritional security of semi-arid farm families benefiting from rainwater collection equipment in Brazil. **Plos One**, [S.L.], v. 15, n. 7, p. 1-14, 14 jul. 2020. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0234974>

FAO - ORGANIZAÇÃO PARA A ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA. **AquaCrop**. Disponível em: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>. Acessado em 26 Jun. 2021.

FERREIRA, V.M. **Irrigação e Drenagem**. Floriano: EDUFPI, 2011, 128 p.

FEWKES, A. Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalised approach. **Urban Water**. Nottingham, v. 1, n. 4, p. 323-333, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00026-1)

FREITAS, J. C. de. **Calibração do modelo Aquacrop e necessidades hídricas da cultura do tomateiro cultivada em condições tropicais**. 2018. 121 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Campina Grande, 2018.

GALLART, F.; SOLÉ, A.; PUIGDEFÀBREGAS, J.; LÁZARO, R. Badland systems in the Mediterranean. In **Dryland rivers: hydrology and geomorphology of semi-arid channels**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2002. p. 299-326.

GIFFONI, V. V.; GADÉA, A. S. M.; COHIM E.; FREITAS, J. J.; ARAUJO, J. F. Sizing of rainwater haversing systems for animal watering in semiarid region. **Water**

practice and technology, [S.L.], v. 14, n. 14, p. 74-85, 2019.
<https://doi.org/10.2166/wpt.2019.080>

GRIS, V. G. C.; BERTOLINI, G. R. F.; JOHANN, J. A. Rural tanks: economic viability and perception of farmers in Palotina-PR. **Revista Nera**, Presidente Prudente, v. 37, n. 20, p. 169-194, 2017. <https://doi.org/10.47946/rnera.v0i37.4755>

IABS - INSTITUTO AMBIENTAL BRASIL SUSTENTÁVEL. **Manual de criação de caprinos e ovinos**. Brasília: CODEVASF, 2011, 142 p.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. 2018. Dados climatológicos de Feira de Santana. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em 11 Out., 2021.

JING, X; ZHANG, S.; ZHANG, J; WANG, Y.; WANG, Y. Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 126, p. 74-85, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.027>

LAL, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. **Science**, [S.L.], v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1097396>

LU, C.; ZHAO, T.; SHI, X.; CAO, S. Ecological restoration by afforestation may increase groundwater depth and create potentially large ecological and water opportunity costs in arid and semiarid China. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 176, p. 1213-1222, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.046>.

MAPBIOMAS - PROJETO DE MAPEAMENTO ANUAL DO USO E COBERTURA DA TERRA NO BRASIL. **Mapeamento anual da cobertura e uso da terra no Brasil (1985 - 2020)**: destaques caatinga. [S. L]: Mapbiomas, 2021. 35 p.

MELO, F. P. L. The Socio-Ecology of the Caatinga: Understanding How Natural Resource Use Shapes an Ecosystem. In: SILVA, J. M. C. da; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. (ed.). **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**. [S.L.]: Spring, 2017. p. 281-302.

MINATTO, M. M. **Água de chuva: uso para irrigação em agricultura familiar**. 2013. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Sustainable development goals**. 2019. Disponível em: https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2019/01/SDG_Guidelines_AUG_2019_Final.pdf. Acesso em: 21 dez. 2021.

ORDUÑA-ALEGRIA, M. E.; SCHÜTZE, N.; NIYOGI, D. Evaluation of Hydroclimatic Variability and Prospective Irrigation Strategies in the U.S. Corn Belt. **Water**, [S.L.], v. 11, n. 12, p. 2447, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11122447>

RAES, D. **AquaCrop training handbooks I: understanding Aquacrop**. Roma: FAO, 2017. 59 p.

RAO, N. H.; SARMA, P. B. S.; CHANDER, S. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 25-32, 1998. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(88\)90130-8](https://doi.org/10.1016/0378-3774(88)90130-8)

SAMPAIO, E. V. de S. B.; MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, Y. de S. B.; FREITAS, A. D. S. de. Sustainable Agricultural Uses in the Caatinga. In: SILVA, J. M. C. da; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. (ed.). **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**. [S.L.]: Spring, 2017. p. 281-302.

SÁNCHEZ, A. S.; COHIM, E.; KALID, R. A. A Review on Physicochemical and Microbiological Contamination of Roof-Harvested Rainwater in Urban Areas. **Sustainability of Water Quality and Ecology**, v. 6, p. 119-137, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.swaqe.2015.04.002>

SANTOS, R. A. dos; MARTINS, D. L.; SANTOS, R. L. Water balance and Köppen climate classification and Thornthwaite in the municipality of Feira de Santana (BA). **Geo Uerj**, Rio de Janeiro, v. 33, p. 1-17, 2018. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2018.34159>

SCHÜTZE, N.; MIALYK, O. **Deficit irrigation toolbox (DIT): user guide**. Dresden: 2019. 15 p.

SCHÜTZE, N.; PALY, M. de; SHAMIR, U. Novel simulation-based algorithms for optimal open-loop and closed-loop scheduling of deficit irrigation systems. **Journal Of Hydroinformatics**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 136-151, 2011. <https://doi.org/10.2166/hydro.2011.073>

SILVA, T. A.; FERREIRA, J.; CALIJURI, M. L.; SANTOS, V. J. dos; ALVES, S. do C.; CASTRO, J. de S. Efficiency of technologies to live with drought in agricultural development in Brazil's semi-arid regions. **Journal of Arid Environments**, [S.L.], v. 192, p. 1-13, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104538>

SINGHAL, A.; GUPTA, R.; SINGH, A. N.; SHRINIVAS, A. Assessment and monitoring of groundwater quality in semi –arid region. **Groundwater For Sustainable Development**, [S.L.], v. 11, p. 100381, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100381>

SUN, M.; GAO, X.; ZHANG, Y.; SONG, X.; ZHAO, X. A new solution of high-efficiency rainwater irrigation mode for water management in apple plantation: design and application. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 259, p. 107243, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107243>.

VAN-ROOY, M. P. A Rainfall Anomaly Index (RAI), Independent of the Time and Space. **Notos**, [S.L.], v.14, p. 43-48, 1965.

WANG, Y.; GUO, S. S.; GUO, P. Crop-growth-based spatially-distributed optimization model for irrigation water resource management under uncertainties and future climate

change. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 345, p. 131182, 2022.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131182>

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 2644-2659, 2016. <https://doi.org/10.1002/joc.4518>

ZHU, Q.; GOULD, J., LI, Y.; MA, C. **Rainwater harvesting for agriculture and water supply**. Londres: Spring, 2015.

**CAPÍTULO 3 - DIMENSÕES ÓTIMAS DA CISTERNA-CALÇADÃO NO
SEMIÁRIDO: AGRICULTURA E PECUÁRIA**

DIMENSÕES ÓTIMAS DA CISTERNA-CALÇADÃO NO SEMIÁRIDO: AGRICULTURA E PECUÁRIA

Juliana Farias Araujo, Anderson de Souza Matos Gadea, Ana Caroline Bastos Lima de Souza, Eduardo Cohim

Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Avenida Transnordestina, Feira de Santana, Bahia, 44036-900, Brasil

Resumo

Verificou-se, em uma revisão bibliométrica, que são poucos os estudos que realizam o dimensionamento otimizado de sistemas de aproveitamento de água de chuva (SAAC) para atender à irrigação em áreas rurais no semiárido. Assim, foi proposta uma metodologia para atingir esse objetivo, baseada na minimização dos custos de construção e no atendimento de uma Eficiência de Atendimento (EA) mínima. Para exemplificá-la, realizou-se um estudo de caso para a cebola (*Allium cepa L.*) na região brasileira semiárida de Feira de Santana (Bahia), considerando um sistema de irrigação suplementar com déficit hídrico controlado, uma EA mínima de 90% e uma área de plantio de 2.500 m². Os resultados indicaram que a combinação ótima é composta por uma área de 130 m² e uma cisterna de 36,1 m³. Além disso, foi recomendado o uso do SAAC para suprir não apenas a agricultura, mas também a dessedentação animal, com o intuito de aproveitar melhor a água de chuva armazenada nos reservatórios. Por fim, verificou-se uma forte relação positiva linear entre o custo de construção do SAAC ótimo e a demanda de irrigação decorrente de dez diferentes áreas de cultivo.

Palavras-chave: Agropecuária familiar. Sistemas descentralizados de água. Irrigação

Abstract

It was found, in a bibliometric review, that there are few studies that perform the optimized dimension of rainwater harvesting systems (RWHS) to meet irrigation demand in rural areas in the semi-arid region. Thus, a methodology was proposed to achieve this objective, based on minimizing construction costs and meeting a minimum Service Efficiency (SE). To illustrate it, a study case was carried out for onion (*Allium cepa L.*) in the semi-arid Brazilian region of Feira de Santana (Bahia), considering a supplementary irrigation system with controlled water deficit, a minimum SE of 90% and a planting area of 2,500 m². The results indicated that the optimal combination is composed of an area of 130 m² and a cistern of 36.1 m³. In addition, the use of RWHS was recommended to supply not only agriculture, but also animal watering, in order to improve the use of the rainwater stored in the reservoirs. Ultimately, there was a strong positive linear relationship between the optimal RWHS construction cost and the irrigation demand arising from ten different crop areas.

Keywords: Family farming. Decentralized water systems. Irrigation.

3.1 INTRODUÇÃO

Historicamente o semiárido foi tido como espaço-problema, terra das secas e da miséria, em razão de julgamentos superficiais que condicionavam essas questões às condições climáticas e geológicas locais. Decorrente dessa visão e do suposto objetivo de impulsionar o desenvolvimento regional, realizaram-se obras de engenharia para “corrigir” os efeitos do semiárido. Porém, os resultados dessas medidas não proporcionaram acesso à água à população em geral, pois os benefícios estiveram vinculados predominantemente às elites, contribuindo para o aumento da dependência e da vulnerabilidade social (BURITI; BARBOSA, 2019).

Nesse sentido, alternativas que possibilitem o acesso descentralizado e democrático da água são cada vez mais relevantes. Essas práticas se adequam as políticas de “Convivência com o semiárido”, que objetivam melhorar a qualidade de vida dos sertanejos, propondo soluções para o monitoramento e a mitigação dos efeitos da seca sobre a produtividade, considerando as potencialidades, as fragilidades e os limites ambientais da região (BRITO *et al.*, 2017).

A irrigação eficiente e o planejamento da irrigação suplementar com déficit hídrico são exemplos de iniciativas de Convivência. A partir delas, o desperdício de água é reduzido, o que é indispensável frente ao aumento de sua demanda decorrente da necessidade crescente de alimentos. Ademais, colaboram com a redução das perdas da produção provocadas pela escassez hídrica, favorecendo o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável por conta do aumento da produtividade agrícola e da renda dos pequenos produtores (ONU, 2019).

Os sistemas de aproveitamento de água de chuva (SAAC) também são alternativas de Convivência, a exemplo das cisternas-calçadão, as quais trazem impactos positivos para as questões sociais e contribuem para o alcance da segurança alimentar das famílias. Apesar desses benefícios, há críticas em relação ao não atendimento das necessidades hídricas domésticas e das plantas durante a estiagem (ALMEIDA *et al.*, 2017).

Assim, recomenda-se o dimensionamento otimizado dos SAAC, a fim de evitar o sub e o superdimensionamento, que resultam respectivamente em sistemas incapazes de fornecer água suficiente e em casos de aumento dos custos incorridos com benefícios limitados. Dentre as variáveis mais utilizadas para a otimização, o custo aparece mais frequentemente, sendo a abordagem mais utilizada a que avalia as despesas com o abastecimento centralizado de água que seriam poupadas por conta do SAAC (SEMAAN *et al.*, 2020).

Porém, essa abordagem não é adequada para áreas que não são atendidas por redes. Assim, este trabalho objetivou propor uma metodologia de dimensionamento otimizado de SAAC para atender não apenas à irrigação suplementar, mas também à pecuária, baseada na minimização dos custos de construção e na fixação da Eficiência de Atendimento (EA) mínima.

3.2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

Realizou-se uma revisão bibliométrica para verificar o estado da arte acerca do dimensionamento otimizado dos SAAC para fins agrícolas, a fim de identificar lacunas referentes ao problema de pesquisa anteposto.

Considerou-se o período de 2016 a 2022 e as buscas foram realizadas em maio de 2022 no *Science Direct*, no *Scopus* e no *Web of Science*, sendo os descritores pesquisados em todo o texto. A *string* montada contém quatro elementos separados pelo *booleano* “AND”. O primeiro termo refere-se ao ponto principal: “*rainwater harvesting*”. O segundo, pelo objetivo da pesquisa (*sizing OR optimization*). O terceiro e o quarto por termos auxiliares para restringir a área de pesquisa (*semiarid*) e para direcionar à *agriculture (OR irrigation)*.

Foram encontrados 704 artigos e atribuiu-se uma pontuação de 2,5 para cada resposta positiva nas quatro questões (Q1, Q2, Q3 e Q4). O Quadro 3.1 exibe os que apresentaram nota total igual ou superior a 7,5, sendo marcado o “x” quando a questão foi respondida.

Q1. Existem trabalhos que tratam sobre SAAC fechados no semiárido?

Q2. Existem trabalhos que tratam sobre SAAC fechados para atender à irrigação?

Q3. Existem trabalhos que tratam sobre o dimensionamento dos SAAC fechados?

Q4. Existem trabalhos que tratam sobre a otimização dos SAAC fechados?

Quadro 3.1 – Avaliação dos artigos que atingiram nota superior a 7,5

Publicação	Questões				Nota
	1	2	3	4	
Reliability Analysis of Rainwater Harvesting Systems in Southern Italy (NOTARO; LIUZZO; FRENI, 2016)	x		x	x	7,5
Transcontinental assessment of secure rainwater harvesting systems across Australia (PETERSON, 2016)	x	x	x		7,5
Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China (JING <i>et al.</i> , 2017)	x	x	x	x	10
A Scoping Review of Roof Harvested Rainwater Usage in Urban Agriculture: Australia and Kenya in Focus (AMOS <i>et al.</i> , 2018)	x	x	x	x	10
Stochastic modelling of the hydrologic operation of rainwater harvesting systems (GUO; GUO, 2018)	x		x	x	7,5

Assessment of rooftop rainwater harvesting in northern (JORDAN ABU-ZREIG; ABABNEH; ABDULLAH, 2019)	x		x	x	7,5
Rainwater harvesting in Jordan: potential water saving, optimal tank sizing and economic analysis (ABDULLAH, 2019)	x		x	x	7,5
Environmental and economic assessment of rainwater harvesting systems under five climatic conditions of Pakistan (ALI; ZHANG; YUE, 2020)	x	x	x		7,5
A multi-parameter method to quantify the potential of roof rainwater harvesting at regional levels in areas with limited rainfall data (CHAPA; KRAUSS; HACK, 2020)	x		x	x	7,5
Rainwater as a renewable resource to achieve net zero urban water in water stressed cities (CROSSON <i>et al.</i> , 2021)	x	x	x	x	10
Minimum cost solution to residential energy-water nexus through rainwater harvesting and greywater recycling (ZHANG; NJEPU; XIA, 2021)		x	x	x	7,5

Observou-se uma preocupação com o dimensionamento dos SAAC, pois todos os trabalhos realizam essa etapa, porém duas dessas pesquisas não consideraram a otimização e uma não foi voltada para o semiárido. A Q2 foi respondida em apenas 55% dos artigos.

Ademais, apenas três receberam pontuação máxima, abordando uma análise completa do problema anteposto. Amos *et al.* (2018) realizaram uma revisão de literatura sobre o uso de água da chuva na agricultura urbana. Jing *et al.* (2017) e Cross *et al.* (2021) consideraram a irrigação das áreas externas da casa. Assim, foram abordadas a demanda urbana, exibindo lacunas a respeito do dimensionamento otimizado do SAAC para fins agrícolas nas áreas rurais.

Por fim, a revisão bibliométrica foi complementada por pesquisas em um buscador mais abrangente, o Google Acadêmico, considerando a *string* e o período antepostos. Encontrou-se o trabalho de Gris, Bertolini e Johann (2017), que dimensionaram a cisterna rural para atender ao cultivo de grãos e à criação de bois e de cabras, sendo a demanda estimada por valores médios de consumo de semestres anteriores. Já Minatto (2013) e Araújo (2019) utilizaram valores únicos de demanda diária para todo o ciclo da alface e do coentro disponíveis na literatura. Assim, nesses estudos não foram retratadas as diferentes sensibilidades de culturas quanto à ausência de água em diferentes estádios fenológicos nem se planejou, a partir da alocação dos eventos de rega, a irrigação suplementar com déficit hídrico, o que é indispensável no semiárido, onde a oferta de água é limitante para o desenvolvimento da agricultura familiar.

3.3 METODOLOGIA

Foram adotadas as seguintes etapas para dimensionar as cisternas-calçadão para atender à irrigação suplementar com déficit hídrico: (i) alocação temporal e quantitativa de diversas lâminas totais de irrigação, com objetivo de maximizar o rendimento agrícola,

gerando uma série de demanda diária para cada lâmina total; (ii) escolha da série, a partir do cálculo da produtividade da água, dentre as geradas; (iii) definição das diversas combinações de área de captação e de volume de cisternas que atendem à demanda com uma EA mínima; (iv) realização da otimização do SAAC, que tem como objetivo a definição da combinação que minimiza os custos de construção dentre todas aquelas que atendem à EA mínima.

Essa metodologia é aplicável a qualquer localidade semiárida e foi simulado o cultivo da cebola (*Allium cepa L*) na região de Feira de Santana (Bahia) para detalhar cada etapa. Também se realizou o dimensionamento considerando a demanda conjunta da agricultura e a decorrente das cabras, a fim de proporcionar o melhor aproveitamento da água armazenada. Foram considerados dois lotes de 30 animais por ano, com período de crescimento de seis meses, sendo que cada um necessita de 5 L.dia⁻¹ (IABS, 2011).

3.3.1 ALOCAÇÃO TEMPORAL E QUANTITATIVA DOS EVENTOS DE IRRIGAÇÃO

O *software Deficit Irrigation Toolbox* (DIT) permite simular o crescimento da planta frente à variabilidade do clima, do solo e da gestão da água. Dentre as estratégias de irrigação implementadas no DIT, utilizou-se a Técnica Evolutiva Global para Programação Ótima de Irrigação (GET-OPTIS), a qual utiliza algoritmos evolutivos para realizar a distribuição temporal e quantitativa da lâmina total, gerando a série que maximiza o rendimento das colheitas (SCHÜTZE; MIALYK, 2019; SCHÜTZE; PALY; SHAMIR, 2011).

Essa etapa de alocação foi repetida para diversas lâminas totais, variando de 0 mm à correspondente a da irrigação suplementar total, gerando uma série de demanda diária para cada lâmina total. Utilizou-se a produtividade da água (Equação 3.1) para definir a série a ser utilizada no dimensionamento do SAAC.

$$PA = \frac{Pr}{P+I} \quad (3.1)$$

Em que: PA é a produtividade da água (kg.m⁻³); Pr, a produção atingida pela cultura (kg) e P, a precipitação total (m³) e I, o volume de irrigação (m³).

Dentre os modelos de crescimento de cultura implementados pelo DIT, utilizou-se o Balanço de Água no Solo (RAO; SARMA; CHANDER, 1988), o qual deriva da equação de Doorenbos e Kassam (1979) e considera a divisão em períodos fenológicos.

Como dados de entrada, é solicitada a série da profundidade da raiz, a qual foi modelada, em planilha eletrônica, conforme o método do Coeficiente Dual da Cultura da FAO 56 (ALLEN *et al.*, 1998).

3.3.2 DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DO SAAC

Foram utilizadas as equações do balanço hídrico seriado com intervalo diário indicadas por Fewkes (2000) para definir as combinações de área de captação e de volume de cisterna que atendem à demanda com uma EA mínima específica. Nesse processo, adotou-se o coeficiente de escoamento de 0,8 e o parâmetro θ – que descreve o momento do consumo da demanda em relação à água que é adicionada à cisterna – de 0,5. Também foi empregada a Equação 3.2 para converter a lâmina diária de irrigação em volume e a Equação 3.3 para calcular a EA de cada combinação.

$$D = \frac{0,4 \times A \times \text{IRN}}{\text{Efi}} \quad (3.2)$$

Em que: D corresponde à demanda diária do sistema de irrigação (L); IRN, à irrigação diária total necessária (mm); Efi, à eficiência de aplicação (%); A, à área de irrigação (m²). A constante 0,4 foi inserida para considerar a fração de área molhada, a qual é o valor mínimo recomendado para as condições semiáridas (EMBRAPA, 2009). Adotou-se a Efi de 90% por se tratar de irrigação por gotejamento (FERREIRA, 2011).

$$\text{EA (\%)} = \frac{\sum Y_{(t)}}{\sum D_{(t)}} 100 \quad (3.3)$$

Em que: $\sum D_{(t)}$ e $\sum Y_{(t)}$ correspondem ao somatório da quantidade de água demandada e ao volume utilizado, respectivamente, durante o período estudado.

Dentre todas as combinações geradas, foi determinada a ótima, que é aquela que minimiza os custos de construção do SAAC. Foram utilizadas as curvas de custo da área de captação e da cisterna para estimar o investimento necessário.

3.3.3 ESTUDO DE CASO: CULTIVO DA CEBOLA EM FEIRA DE SANTANA

A metodologia foi aplicada para a simulação do cultivo da cebola em uma área de plantio de 2.500 m² na zona rural de Feira de Santana (Bahia), localizada no semiárido brasileiro. Foram simulados três cenários: produção de sequeiro – sem irrigação, ou seja, precipitação como única fonte de água para as culturas; irrigação suplementar com deficit

de água; irrigação suplementar total – assumindo disponibilidade ilimitada de água para irrigação e a aplicação de água sempre que a umidade do solo for inferior a 90% da capacidade de campo.

Em todos os cenários foi considerada a data de plantio como sendo 1º de maio, a fim de simular os meses que apresentam os maiores volumes de chuvas e as menores temperaturas (SANTOS; MARTINS; SANTOS, 2018). Os parâmetros necessários para modelar a raiz e para calibrar o modelo no DIT foram obtidos na literatura para localidades que possuem características climáticas semelhantes às da área de estudo (Tabela 3.1).

A série climática de 20 anos (1998-2017) foi obtida no Instituto Nacional de Meteorologia. As falhas dos dados de evapotranspiração de referência foram preenchidas a partir dos valores encontrados automaticamente no *AquaCrop* (FAO, 2021) e as de precipitação e de temperatura a partir dos dados disponibilizados por Xavier, King e Scalon (2016). A série sem falhas apresenta as seguintes médias anuais: precipitação de 705 mm, evapotranspiração potencial de 1.159 mm, temperatura mínima de 20 °C e máxima de 30 °C.

Tabela 3.1 – Dados do solo e da cultura necessários para realizar as modelagens

Característica	Valor	Unidade	Fonte
Altura máxima da planta (Cebola)	0,4	m	Allen <i>et al.</i> (1998)
Capacidade de Campo e Ponto de Murcha Permanente (Textura franco-arenosa)	22; 10	%	Raes (2017)
Coefficiente basal inicial e médio (Cebola)	0,15; 0,95	-	Allen <i>et al.</i> (1998)
Coefficientes da cultura (Cebola)	0,58; 0,83; 0,94; 0,69	-	Lopes Filho (2013)
Duração das fases fenológicas (Cebola)	17; 26; 39; 33	dias	Lopes Filho (2013)
Produtividade máxima (Cebola)	40	t.ha ⁻¹	Doorenbos e Kassam (1979)
Profundidade inicial da semeadura (Cebola)	1,5	cm	Embrapa (2021)
Profundidade máxima efetiva (Cebola)	0,45	m	Allen <i>et al.</i> (1998)

Os custos relativos à construção da cisterna foram levantados em função dos insumos e dos trabalhadores necessários. Para isso, foram realizados os orçamentos, em planilha eletrônica, para as cisternas com volumes de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80 e 100 m³, possibilitando a interpolação, a partir da curva de melhor ajuste, para se obter o custo de cisterna para qualquer capacidade nesse intervalo. O mesmo procedimento foi

realizado para a área de captação, e foram consideradas as seguintes áreas: 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 e 400 m².

Nesse processo, foram consideradas as técnicas construtivas adotadas pelo Programa Uma Terra e Duas Águas (P1+2), ou seja, um calçadão pavimentado para captar a água de chuva e uma cisterna de placas de concreto, construída na parte mais baixa do terreno, para armazenar o volume captado. Foi previsto um conjunto de tubos de PVC para conectar a área de captação com a cisterna e não se levou em consideração a manutenção do sistema.

Por fim, a EA foi adotada como 90% por ser a recomendada por Giffoni *et al.* (2019) para Feira de Santana (BA) para dessedentação animal e por ser superior ao indicado por Zhu *et al.* (2015) para a pecuária (75%) e para agricultura (50 - 75%).

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1 ESTUDO DE CASO

As simulações mostram que a produção máxima de cebola de 2.300 kg obtida para a situação de sequeiro (água somente decorrente da precipitação) pode ser incrementada com o uso da irrigação suplementar com déficit hídrico. A partir da Figura 3.1, observa-se que esse incremento diminui com o aumento das lâminas totais. Assim, é importante utilizar a produtividade da água (Figura 3.2) para definir a série de demanda de irrigação decorrente da alocação temporal e quantitativa da lâmina total a ser utilizada no dimensionamento do SAAC, com o intuito de aproveitar melhor o recurso mais limitante no semiárido: a água.

Figura 3.1 – Incremento da produção da cebola, em uma área de cultivo de 2.500 m², em função das lâminas totais na região de Feira de Santana

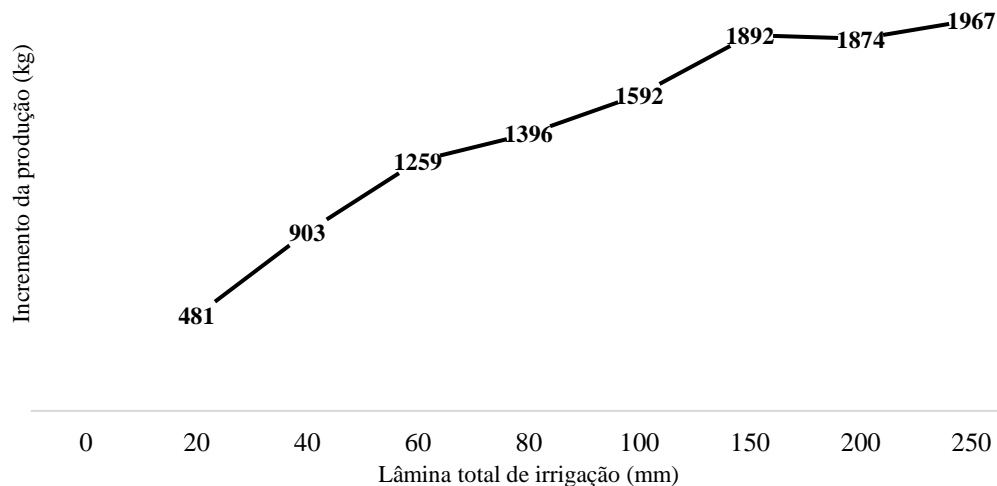
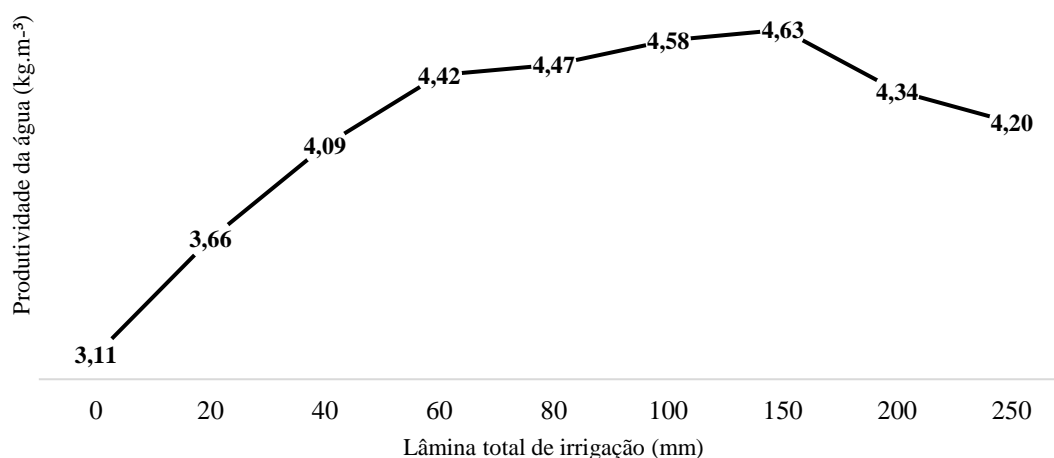


Figura 3.2 – Produtividade da água em função das lâminas no cultivo da cebola na região de Feira de Santana



Há uma variação pequena (0,21 kg.m⁻³) entre a produtividade calculada para a lâmina de 60 a 150 mm. Assim, é adequado o uso da série de demanda decorrente da alocação da menor (60 mm), a qual demanda apenas 23,2 m³ em maio, 20,2 m³ em junho, 18,8 m³ em julho e 4,5 m³ em agosto e possibilita aumentar a produção em 54% (1.259 kg).

Esse percentual está contido no intervalo (22 a 88%) encontrado por Zhu *et al.* (2015) em um trabalho experimental realizado para verificar o potencial da irrigação suplementar para diversas culturas viabilizada pelos SAACs do “1-2-1 Project” na China. E é 64% inferior ao obtido no cenário de acesso ilimitado de água, que demandou a lâmina total de 208 mm, resultando no aumento da pegada hídrica de 164 m³ (Equação 3.2) em uma área de 2.500 m².

Apesar da redução provocada pelo uso da irrigação suplementar com déficit em comparação com a suplementar total ter sido maior do que o encontrado por Asmamaw *et al.* (2021) em uma análise de regressão entre as produções da cebola e as economias de água, essa redução é pequena, quando considerada a área que pode ser irrigada com o volume poupado.

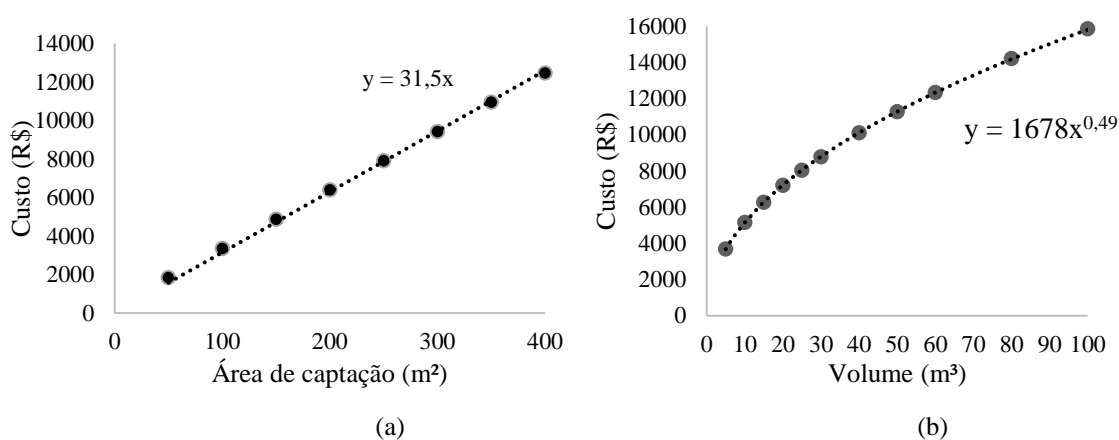
3.4.1.2 Dimensionamento otimizado dos SAACs

O dimensionamento foi baseado no balanço hídrico seriado com intervalo diário de Fewkes (2000). Apesar da modelagem desenvolvida por Jing *et al.* (2017) ser focada para área urbana, eles também utilizaram um modelo comportamental, porém mantiveram fixa a área de captação, variando apenas o volume da cisterna. Com isso, verificaram o

atendimento máximo de 80% da demanda de um gramado com área de 2.000 m² em regiões semiáridas chinesas. Esse valor é inferior a EA de 90%, assim é apontada a importância de variar a área, pois isso permite a captação de mais chuva.

Nesse sentido, foram determinadas diversas combinações de área de calçada e de volume de cisterna que atendem a essa EA e foi definida a ótima como aquela que minimiza os custos associados à construção do SAAC. Para isso, foram utilizadas as equações de custo exibidas na Figura 3.3, sendo verificado um comportamento exponencial para a curva da cisterna e um linear para a da área de captação.

Figura 3.3 – Equações de custo da construção da área de captação (a) e da cisterna (b)



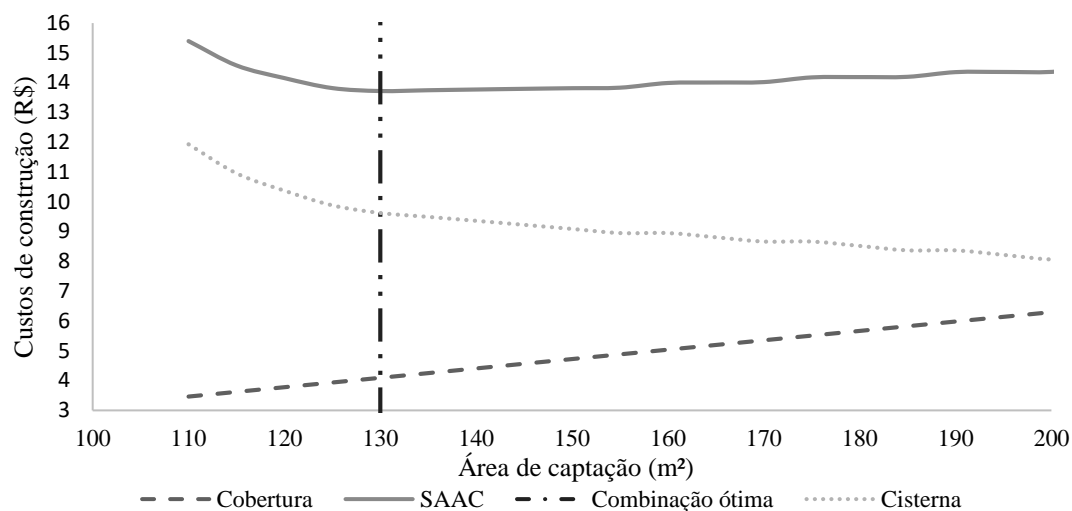
Os custos de construção da área de captação e da cisterna e o total de cada combinação são exibidos na Figura 3.4. Evidencia-se que, à medida que a área de captação aumenta, o custo associado à sua construção também cresce. Porém, o referente à cisterna decresce, o que mostra que existe de fato um ponto de menor custo total.

Esse ponto ótimo consiste em uma área de captação de 130 m² e por uma cisterna de 36,1 m³, sendo necessário um investimento de R\$13.719. Não foi encontrada uma dimensão de reservatório que atendesse à demanda com áreas inferiores a 110 m², pois, mesmo que se aumentasse o volume da cisterna, não haveria captação de água necessária para enchê-la.

Ressalta-se que a água armazenada está sendo utilizada apenas durante o cultivo agrícola. Assim, recomenda-se a criação de animais ao longo de todo o ano, a fim de gerar um maior retorno econômico para os agricultores e o melhor aproveitamento da água captada. Nesse contexto, acrescentou-se a demanda fixa de dois lotes de 30 cabras por ano, que exigiu um SAAC otimizado constituído por uma área de 235 m² e por uma cisterna de 32,1 m³, sendo necessário um investimento de R\$16.490. Essa dimensão está

dentro do usual construído na China com o “1-2-1 Project”, que é de 30 a 70 m³ (ZHU *et al.*, 2015).

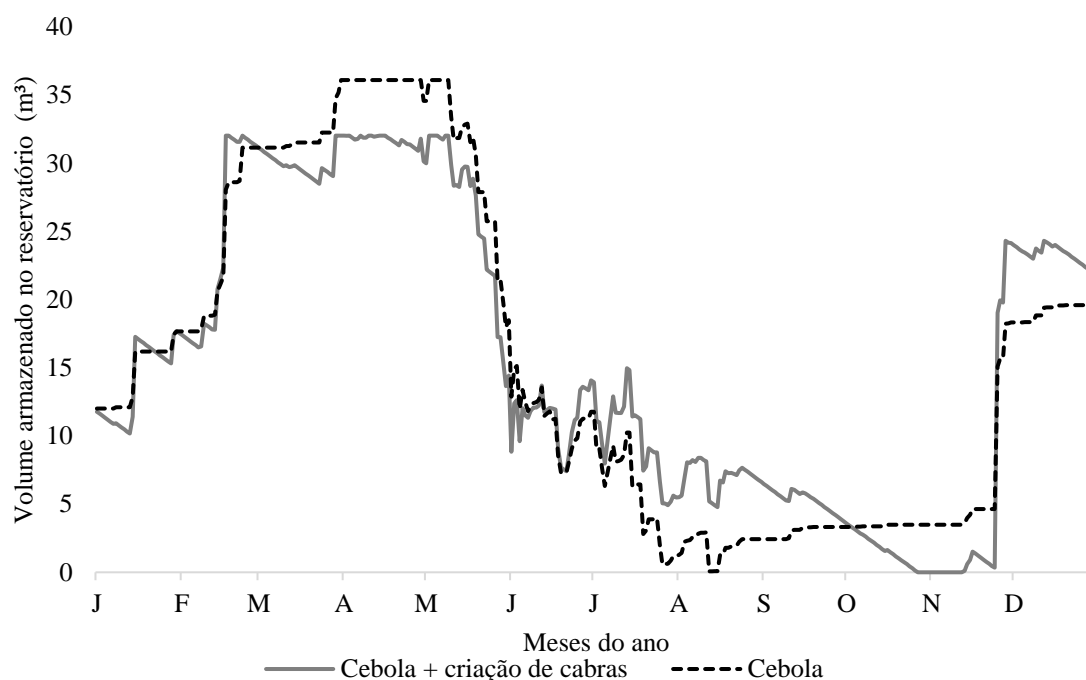
Figura 3.4 – Custos envolvidos na construção dos componentes do sistema e o total para atender à demanda da cebola



A criação desses animais proporciona a redução dos picos de água armazenada, principalmente durante os meses em que não há o cultivo agrícola (Figura 3.5). Além disso, gera uma contrapartida de benefícios importante, pois o SAAC proporcionaria o aumento da receita de R\$21.000 por ano, no que se refere à pecuária e de R\$5.979 decorrente da venda da cebola, resultando em uma razão entre os benefícios e o investimento (R\$16.490) de 1,64. Esse valor é superior ao quociente de 0,44 encontrado a produção da cebola. Nessa análise, foram desconsideradas as outras despesas envolvidas na criação pecuária e agrícola e considerados o preço de venda médio do período de outubro de 2020 a 2021 da cebola (R\$1,68) e o de cada animal de R\$350 (CONAB, 2021) e a situação hipotética da venda de toda a produção agrícola.

Esse impacto seria ainda mais positivo se houvesse mais incentivo para que as famílias que residem no semiárido brasileiro optassem pela implementação desse sistema de irrigação, viabilizado pelo SAAC otimizado. A partir disso, possibilitaria a diversificação dos cultivos pelos pequenos agricultores, trazendo melhorias não apenas para os aspectos relacionados com a segurança alimentar, hídrica e nutricional, mas também para o aumento da renda dos agricultores familiares. Desse modo, contribuiria para a fixação deles no campo, diminuindo os problemas decorrentes do êxodo rural.

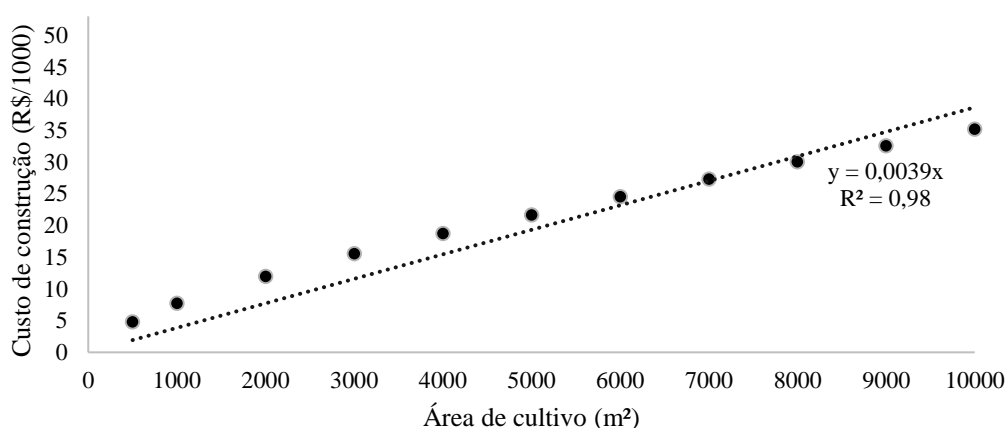
Figura 3.5 – Volume de água simulado disponível na cisterna no atendimento da demanda da cebola e da criação das cabras conjuntamente com a cebola



Além disso, reduziria a dilapidação dos sistemas hídricos nacionais e a intensidade dos problemas decorrentes de salinização, pois os SAACs não demandariam nenhuma água de corpos hídricos (água azul) e a água de chuva apresenta menor salinidade do que outras fontes hídricas disponíveis no semiárido, como a água subterrânea e os açudes.

3.4.1.2 Análise de sensibilidade

O comportamento dos custos de construção do SAAC otimizado em relação à demanda otimizada da cebola para dez diferentes áreas de cultivo (1.000 m², 2.000 m², 3.000 m², 4.000 m², 5.000 m², 6.000 m², 7.000 m², 8.000 m², 9.000 m² e 10.000 m²) foi observado na Figura 3.6. Foi verificada uma relação linear positiva, apresentando uma correlação perfeita, de acordo com a categorização sugerida por Callegari-Jacques (2007), com coeficiente de correlação de Pearson de 0,95. A equação linear encontrada facilita a realização de orçamentos do e também a verificação da viabilidade econômica da construção dessa alternativa de convivência com o semiárido, facilitando o desenvolvimento de trabalhos, como o de Jing *et al.* (2017).

Figura 3.6 – Custo de construção (R\$) versus área de cultivo (m²)

3.5 CONCLUSÕES

Foram observadas lacunas na literatura quanto ao dimensionamento ótimo do SAAC para atender à demanda agrícola em localidades rurais semiáridas. Assim, apresentou-se uma metodologia para auxiliar a essa tomada de decisão, com foco no atendimento da série diária de demanda de irrigação suplementar com déficit hídrico e da demanda de uma criação de cabras e na minimização dos custos envolvidos na construção do SAAC.

Para exemplificar essa metodologia, foi realizado um estudo de caso na região de Feira de Santana – Bahia – Brasil, em que obtido que o SAAC ótimo para atender à demanda da cebola corresponde ao formado pela área de captação de 130 m² e por uma cisterna de 36,1 m³, sendo necessário um investimento de R\$13.719.

Também foi determinado que a análise de uma demanda fixa para atender à necessidade hídrica de dois lotes de 30 cabras por ano requer o aumento de apenas 20% do investimento necessário e proporciona a redução dos picos de água armazenada nas cisternas, principalmente nos meses em que não há o cultivo das culturas agrícola. A razão entre os benefícios decorrentes do cultivo da cebola das cabras e o investimento da construção do SAAC é de 1,46, sendo superior ao obtido quando se considera apenas a cultura agrícola (0,44).

Ademais, foi verificada uma forte relação positiva entre as diferentes áreas de cultivo e o custo de construção do SAAC ótimo, o que proporciona que seja realizada a estimada dos custos por meio de equações lineares (com coeficientes de correlação de Pearson de 0,95) que dependem apenas da área de plantação.

Para trabalhos futuros, recomenda-se que sejam avaliados os outros insumos envolvidos no contexto da produção agrícola e pecuária, a fim de levar em consideração

mais atributos no estudo da viabilidade econômica dos SAAC, a qual pode ser utilizado como um meio para o agricultor escolher a cultura a se produzir.

3.6 FINANCIAMENTO DA PESQUISA

Esta pesquisa contou com o incentivo do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), que concederam, respectivamente, bolsas de Iniciação Científica (pedido nº 159878/2020-9) e de Mestrado (pedido nº 1204/2020).

REFERÊNCIAS

- ABDULLA, F. Rainwater harvesting in Jordan: potential water saving, optimal tank sizing and economic analysis. **Urban Water Journal**, [S.L.], v. 17, n. 5, p. 446-456, 2019.
- ABU-ZREIG, M.; ABABNEH, F.; ABDULLAH, F. Assessment of rooftop rainwater harvesting in northern Jordan. **Physics And Chemistry Of The Earth, Parts A/b/c**, [S.L.], v. 114, p. 102794-102804, 2019.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998, 301p. Irrigation and Drainage Paper 56.
- ALI, S.; ZHANG, S.; YUE, T. Environmental and economic assessment of rainwater harvesting systems under five climatic conditions of Pakistan. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 259, p. 120829, 2020.
- ALMEIDA, C.; BEBÉ, F.; LIMA, P.; SILVA, M.; FREITAS, P. Cenário da agricultura familiar em comunidades quilombolas do Território Sertão Produtivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA, 10, 2017, Brasília. **Anais [...]** Brasília: Aba, 2017. v. 13, p. 1-7.
- AMOS, C. C.; RAHMAN, A.; KARIM, F.; GATHENYA, J. M. A scoping review of roof harvested rainwater usage in urban agriculture: Australia and Kenya in focus. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 202, p. 174-190, 2018.
- ARAÚJO, D. R. D. **A captação da água de chuva para regularizar a vazão de irrigação da agricultura familiar**. 2019. 52 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Sistemas Agroindustriais, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2019.
- ASMAMAW, D. K.; JANSSENS, P.; DESSIE, M.; TILAHUN, S.; ADGO, E.; NYSSSEN, J.; WALRAEVENS, K.; CORNELIS, W. Deficit irrigation as a sustainable option for improving water productivity in Sub-Saharan Africa: the case of Ethiopia. A critical review. **Environmental Research Communications**, [S.L.], v. 3, n. 10, p. 102001, 2021. <http://dx.doi.org/10.1088/2515-7620/ac2a74>.

BRITO, F. C. da S.; LIMA, D. C.; SOUSA, J. D.; MEDEIROS, A. C.; MARACAÇA, P. B.; MEDEIROS, A. P.; PAIVA, A. C. C. Uma abordagem histórica e teórica das políticas públicas de combate à seca e convivência com o semiárido. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, Pombal, v. 11, n. 1, p. 57-65, 2017.

BURITI, C. de O.; BARBOSA, H. A. Secas e vulnerabilidade socioambiental no semiárido brasileiro: a institucionalização dos estudos científicos e das políticas hídricas na região. **Ciência Geográfica**, Baruaru, v. 23, p. 267-282, 2019.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: ARTMED, 2007.

CHAPA, F.; KRAUSS, M.; HACK, J. A multi-parameter method to quantify the potential of roof rainwater harvesting at regional levels in areas with limited rainfall data. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 161, p. 104959, 2020.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Preços agrícolas, da sociobio e da pesca**. Disponível em: <http://sisdep.conab.gov.br/precosiagroweb/>. Acesso em: 13 nov. 2021.

CROSSON, C.; TONG, D.; ZHANG, Y.; ZHONG, Q. Rainwater as a renewable resource to achieve net zero urban water in water stressed cities. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 164, p. 105203, 2021.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193p. Irrigation and Drainage Paper, 33.

EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Como plantar cebola**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/hortalicas/cebola/plantio>. Acesso em: 05 out. 2021b.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema de Produção de Melancia**. 2009. Disponível em: <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Melancia/SistemaProducaoMelancia/irrigacao.htm>. Acesso em: 20 abr. 2021.

FAO - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **AquaCrop**. Disponível em: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>. Acesso em: 24 nov. 2021.

FERREIRA, V. M. **Irrigação e Drenagem**. Florianópolis: EDUFPI, 2011. 128 p.

FEWKES, A. Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalised approach. **Urban Water**. Nottingham, v. 1, n. 4, p. 323-333, 2000.

GIFFONI, V. V.; GADÉA; A. S. M.; COHIM E.; FREITAS, J. J.; ARAUJO, J. F. Sizing of rainwater harvesting systems for animal watering in semiarid region. **Water practice and technology**, 2019.

- GRIS, V. G. C.; BERTOLINI, G. R. F.; JOHANN, J. A. Cisternas rurais: viabilidade econômica e percepção de agricultores do município de palotina-pr. **Revista Nera**, Presidente Prudente, v. 37, n. 20, p. 169-194, 2017.
- GUO, R.; GUO, Y. Stochastic modelling of the hydrologic operation of rainwater harvesting systems. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 562, p. 30-39, 2018.
- IABS- INSTITUTO AMBIENTAL BRASIL SUSTENTÁVEL. **Manual de criação de caprinos e ovinos**. Brasília: CODEVASF, 2011. 142 p.
- JING, X.; ZHANG, S.; ZHANG, J; WANG, Y.; WANG, Y. Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 126, p. 74-85, 2017.
- LOPES FILHO, A. F. **Demanda hídrica e produtividade da cebola irrigada, cultivada em sistema convencional e orgânico no norte da Bahia**. 2013. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2013.
- MINATTO, M. M. **Água de chuva: uso para irrigação em agricultura familiar**. 2013. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- NOTARO, V.; LIUZZO, L.; FRENI, G. Reliability Analysis of Rainwater Harvesting Systems in Southern Italy. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 162, p. 373-380, 2016.
- ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Sustainable development goals**. 2019. Disponível em: https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2019/01/SDG_Guidelines_AUG_2019_Final.pdf.. Acesso em: 21 dez. 2021.
- PETERSON, E. L. Transcontinental assessment of secure rainwater harvesting systems across Australia. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 106, p. 33-47, 2016.
- RAES, D. **AquaCrop training handbooks I: understanding Aquacrop**. Roma: FAO, 2017. 59 p.
- RAO, N. H.; SARMA, P. B. S.; CHANDER, S. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 25-32, 1988.
- SANTOS, R. A. dos; MARTINS, D. L.; SANTOS, R. L. Balanço hídrico e classificação climática de Köppen e Thornthwaite no município de Feira de Santana (BA). **Geo Uerj**, Rio de Janeiro, v. 33, p. 1-17, 2018.
- SCHÜTZE, N.; MIALYK, O. **Deficit irrigation toolbox (DIT): user guide**. Dresden: 2019. 15 p.

SCHÜTZE, N.; PALY, M. de; SHAMIR, U. Novel simulation-based algorithms for optimal open-loop and closed-loop scheduling of deficit irrigation systems. **Journal Of Hydroinformatics**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 136-151, 2011.

SEMAAN, M.; DAY, S. D.; GARVIN, M.; RAMAKRISHNAN, N.; PEARCE, A. Optimal sizing of rainwater harvesting systems for domestic water usages: a systematic literature review. **Resources, Conservation & Recycling**: X, [S.L.], v. 6, p. 100033-100055, 2020.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 2644-2659, 2016.

ZHU, Q.; GOULD, J., LI, Y.; MA, C. **Rainwater harvesting for agriculture and water supply**. Londres: Spring, 2015.

**CAPÍTULO 4 - TOROH: FERRAMENTA PARA DIMENSIONAMENTO E
OTIMIZAÇÃO DE CISTERNAS**

TOROH: FERRAMENTA PARA DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE CISTERNAS

Juliana Farias Araujo, Anderson de Souza Matos Gadea, Caio Enrique Moura Seara, Jadson Alves da Costa, Eduardo Cohim

Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Avenida Transnordestina, Feira de Santana, Bahia, 44036-900, Brasil

Resumo

Os sistemas de aproveitamento de água de chuva (SAAC) vêm sendo cada vez mais utilizados. Nesse contexto, este trabalho objetiva apresentar a ferramenta computacional TOROH, que auxilia na análise, no dimensionamento, na otimização e no estudo da viabilidade financeira da construção desses sistemas. Nesse processo, são utilizadas as equações do balanço hídrico seriado com intervalo diário e as de custo de construção da área de captação e da cisterna para estimar a combinação desses componentes que minimizam os custos de implementação. Também foram simulados três estudos de casos, considerando a demanda da pecuária, a agrícola e a soma das duas na região de Feira de Santana – Bahia – Brasil. Como resultado, obteve-se que SAAC ótimo para atender à irrigação suplementar com déficit hídrico é constituído por uma área de captação de 180 m² e por um volume de cisterna de 47,1 m³, sendo necessário um investimento de R\$16.750,8. Esse custo é apenas 14% inferior ao indicado para implementar o SAAC para atender a essa demanda conjuntamente com a da dessedentação de dois rebanhos de 50 cabras no ano, proporcionando o melhor aproveitamento da água armazenada e possibilitando gerar mais renda para o pequeno agricultor. Também foi indicada a viabilidade financeira da implementação do SAAC para atender à demanda agrícola, sendo obtido Valor Presente Líquido positivo e quociente entre receitas e custos superior a um. Por fim, ressalta-se que as etapas realizadas no TOROH colaboram com o Plano Nacional de Recursos Hídricos e proporcionam SAACs otimizados que possibilitam melhorias no que tange à segurança hídrica e alimentar das famílias.

Palavras-chave: Modelagem computacional. Eficiência de Atendimento. Tecnologias sociais. Convivência com o semiárido.

Abstract

Rainwater use systems (RWHS) are increasingly being used. In this context, this work aims to present the TOROH computational tool that assists in the analysis, sizing, optimization and study of the financial viability of the construction of these systems. In this process, the equations of the serial water balance with daily interval and the cost of construction of the catchment area and the cistern are used to determine the combination of these components that minimizes implementation costs. Three case studies were also simulated, considering the demand of livestock, agriculture and the sum of the two in the region of Feira de Santana - Bahia - Brazil. As a result, it was obtained that RWHS optimal to meet the supplementary irrigation with water deficit consists of a catchment area of 180 m² and a cistern volume of 47.1 m³, and an investment of R\$16,750.8 is necessary. This cost is only 14% lower than indicated to implement the RWHS to meet this demand together with the watering of two herds of 50 goats in the year, providing the best use of stored water and enabling generating more income for the small farmer. It was also indicated the financial viability of the implementation of RWHS to meet the

agricultural demand, being obtained positive Net Present Value and quotient between revenues and costs greater than one. Finally, it is emphasized that the steps performed at TOROH collaborate with the National Water Resources Plan and provide optimized RWHSs that enable improvements in terms of water and food safety of families.

Keywords: Computational modeling. Service Efficiency. Social technologies. Coexistence with the semiarid.

4.1 INTRODUÇÃO

A região semiárida brasileira concentra a maior população rural do país e apresenta atributos que comprometem a oferta de água, resultando em rios com regime predominantemente temporário e na baixa disponibilidade de recursos subterrâneos com qualidade adequada para atender à irrigação, à agricultura e aos fins domésticos (ASA, 2021a; BAPTISTA; CAMPOS, 2014; IBGE, 2018). Como exemplo desses atributos, têm-se as altas taxas de evapotranspiração e a disponibilidade predominante de solos rasos e de embasamento geológico cristalino, o que dificulta o armazenamento da água. Além disso, a região apresenta regime de chuvas muito variado, sendo marcado pela irregularidade e por secas periódicas e prolongadas, de modo que o semiárido já sofreu com 48 episódios de secas, dos quais 19 duraram ao menos dois anos, desde o século XVI (FARRICK; BRANFIREUN, 2015; LEDRU *et al.*, 2020).

Nesse contexto, é de grande valia o incentivo às técnicas de abastecimento hídrico que considerem as peculiaridades locais, como a incerteza do período chuvoso, que é melhor definido pela irregularidade do que pela escassez real, o crescimento populacional e a necessidade de aumento da produção de alimentos (ANDRADE *et al.*, 2017).

Exemplo dessas técnicas são os sistemas de aproveitamento de água de chuva (SAAC), que proporcionam o abastecimento hídrico descentralizado, trazendo benefícios para as áreas rurais, pois disponibilizam uma fonte hídrica que apresenta boa qualidade decorrente do processo de destilação natural relacionado ao ciclo hidrológico, contribuindo para o aumento da produção de alimentos de origem animal e vegetal. Assim, trazem melhorias no que tange à segurança alimentar, hídrica e nutricional e à geração de renda para os agricultores familiares (ASA, 2021b; SÁNCHEZ; COHIM; KALID, 2015).

Para se ampliar esses benefícios, é preciso dimensionar os SAACs. Contudo, a NBR 15527 (ABNT, 2019), que trata sobre o uso desses sistemas no Brasil, não faz a especificação de um método de dimensionamento, determinando apenas que devem ser

considerados os critérios econômicos, técnicos e ambientais. Além disso, devem ser avaliados a área de captação, o regime pluviométrico e a demanda.

A consideração dessas variáveis faz com que o dimensionamento dos SAACs seja bastante complexo e demorado (MARCONI; BRANDÃO, 2018). Nesse sentido, as alternativas que auxiliem nessa tomada de decisão e proporcionem resultados confiáveis obtidos de modo não laborioso trazem grande contribuição.

Nesse contexto, este trabalho objetiva apresentar a ferramenta computacional TOROH, que possibilita o dimensionamento e a otimização de sistemas de água da chuva e a realização da análise financeira da sua implementação. Também serão apresentados três estudos de caso focados em uma localidade brasileira semiárida para exemplificar uma das aplicações do programa.

4.2 METODOLOGIA

A ferramenta computacional TOROH teve seu desenvolvimento iniciado com o trabalho de Giffoni (2019) para dessedentação animal. Neste atual estudo, o seu código foi atualizado e reescrito na linguagem livre *Python 3*, com acréscimos de novas funções, entre as quais possibilitam a análise de demanda variável ao longo do tempo, a transformação da lâmina em volume de irrigação e a análise da viabilidade financeira.

Dentre as novas funcionalidades do programa, aponta-se a análise do SAAC em áreas urbanas em que há o abastecimento híbrido decorrente da água oriunda da concessionária e dos SAACs. Já para as áreas rurais, o TOROH possibilita analisar, dimensionar e otimizar o SAAC, considerando a água da chuva como sendo a única fonte hídrica, seja por apresentar qualidade superior às das outras disponíveis ou por conta da irregularidade do abastecimento da concessionária em localidades remotas.

Este trabalho está focado na apresentação de algumas das funcionalidades das áreas rurais, que inclui o estudo de demandas diárias fixas e as variáveis ao longo do tempo. Desse modo, possibilita-se a análise de SAAC para atender à demanda de rebanhos, de moradores e de sistemas de irrigação que não possuem uma necessidade hídrica diária fixa. No TOROH, é possível inclusive converter as lâminas de irrigação em volume por meio da Equação 4.1.

$$D(t) = \frac{0,4 \times A \times IRN}{E_{fi}} \quad (4.1)$$

Em que: $D(t)$ corresponde à demanda diária da irrigação (L); IRN, à irrigação total (mm); Efi, à eficiência de aplicação (%); A, à área de irrigação (m^2). A constante 0,4 representa o valor mínimo para a fração de área molhada recomendado para o semiárido (EMBRAPA, 2009).

Foram implementadas as Equações 4.2, 4.3 e 4.4 do balanço hídrico seriado com intervalo diário, as quais foram apresentadas por Fewkes (2000).

$$Q_{(t)} = P_{(t)} \times A \times C \quad (4.2)$$

$$Y_{(t)} = \min \left\{ \begin{array}{l} D_{(t)} \\ V_{(t-1)} + \theta Q_{(t)} \end{array} \right. \quad (4.3)$$

$$V_{(t)} = \min \left\{ \begin{array}{l} V_{(t-1)} + Q_{(t)} - Y_{(t)} \\ R - (1 - \theta)Y_{(t)} \end{array} \right. \quad (4.4)$$

Em que: $Q_{(t)}$ se refere à quantidade de água (litros), que flui para o reservatório no intervalo de tempo t (dia); $P_{(t)}$ corresponde à precipitação nesse período (mm); A é a área de captação (m^2), C ao coeficiente de escoamento superficial e θ é um coeficiente adimensional varia de 0 a 1, admitido como $\theta = 0,5$, com o intuito abordar uma situação intermediária. As outras variáveis estão expressas em litros e $D_{(t)}$ refere-se à demanda diária total no período t ; $Y_{(t)}$ é o volume de água utilizado para suprir a demanda; $V_{(t)}$ é o volume armazenado no reservatório e R é a capacidade do reservatório.

Também foi implementada a Equação 4.5, que permite calcular a Eficiência de Atendimento (EA).

$$EA(\%) = \frac{\sum Y_{(t)}}{\sum D_{(t)}} 100 \quad (4.5)$$

Em que: $\sum D_{(t)}$ e $\sum Y_{(t)}$ correspondem ao somatório da quantidade de água demandada e ao volume utilizado, respectivamente, durante o período estudado.

A otimização em áreas rurais tem como função objetivo a minimização do custo total envolvido na construção do SAAC, incluindo o referente à captação e à cisterna. Assim, são avaliadas todas as combinações encontradas que atendem a EA mínima especificada e determinada a que apresenta o menor custo total.

A análise da viabilidade financeira do SAAC em áreas rurais é realizada por meio do cálculo do Valor Presente Líquido (Equação 4.6) e do quociente entre receitas e os custos (Re/C) (Equação 4.7).

$$VPL = Re \times \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i \times (1+i)^n} \right) - D \times \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i \times (1+i)^n} \right) - S \quad (4.6)$$

Em que: VPL corresponde ao Valor Presente Líquido; i , à taxa mínima de atratividade (TMA); n , ao número de anos; Re , às receitas anuais decorrentes da produção possibilitada pela implementação do SAAC; D , às despesas anuais e S , aos investimentos necessários para a construção do SAAC.

$$Re/C = \frac{Re \times \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i \times (1+i)^n} \right)}{D \times \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i \times (1+i)^n} \right) + S} \quad (4.7)$$

4.2.1 ESTUDOS DE CASO

Neste trabalho, foram simulados três estudos de caso para exemplificar aplicações da ferramenta computacional TOROH, a saber: 1) cisterna-calçadão no atendimento da irrigação suplementar com déficit hídrico utilizada no cultivo do milho em uma área de 4.000 m²; 2) cisterna-calçadão no atendimento de dois rebanhos de 50 cabras no ano; 3) cisterna-calçadão no atendimento conjunto dessas duas demandas. No estudo de caso 1, também foi realizada a análise financeira para verificar se é viável a implementação do SAAC.

Em todas as simulações foi adotado o coeficiente de escoamento superficial de 0,8 e foram utilizadas as séries históricas dos dados climatológicos da região brasileira de Feira de Santana, a qual está localizada no estado da Bahia e apresenta clima semiárido. Esses dados foram obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia, abrangendo 20 anos (1998-2017) (INMET, 2018) e as falhas dos dados de evapotranspiração de referência foram preenchidas com a série encontrada no *AquaCrop* (FAO, 2021), o qual utiliza o método padrão de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998). Já as falhas de precipitação e de temperatura mínima e máxima foram preenchidas a partir dos dados disponibilizados por Xavier, King e Scalon (2016). Essa série sem falhas apresenta precipitação média anual de 705 mm, evapotranspiração potencial média anual de 1.159 mm, temperatura mínima média anual de 20 °C e máxima de 30 °C.

A concepção da cisterna-calçadão para atender às demandas, com EA de 75% (ZHU *et al.*, 2015), foi baseada nas técnicas construtivas estabelecidas pelo Programa Uma Terra e Duas Águas (P1+2), ou seja, um calçadão pavimentado para captar a água de chuva e uma cisterna de placas de concreto, construída na parte mais baixa do terreno, para armazenar o volume captado. Para a conexão do calçadão com a cisterna, foi previsto um conjunto de tubos de PVC. As despesas decorrentes da contratação de mão de obra foram contabilizadas, porém, não foi considerada a manutenção do sistema.

Para definir as curvas de melhor ajuste a ser inserida no TOROH para possibilitar a otimização da cisterna-calçadão, foram realizados orçamentos dos materiais e da mão de obra necessários para a sua construção, em uma planilha eletrônica, para as cisternas com capacidades de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80 e 100 m³, possibilitando a interpolação para se obter o custo de cisterna para qualquer volume nesse intervalo. O mesmo procedimento foi realizado para a área de captação, e foram consideradas as seguintes áreas: 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 e 400 m². Nesse processo, foi utilizado o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI, 2021) e o banco de dados do Sistema de Orçamento de Obras de Sergipe (ORSE, 2021).

4.2.1.1 Estudo de caso 1

Foi utilizada a estratégia de irrigação denominada Técnica Evolutiva Global para Programação Ótima de Irrigação (GET-OPTIS) (SCHÜTZE; PALY; SHAMIR, 2011) para estimar a produção do milho em uma área de 4.000 m² e para criar o arquivo de demanda diária da irrigação suplementar com déficit hídrico. Essa estratégia está disponível no *Deficit Irrigation Toolbox* (SCHÜTZE; MIALYK, 2019) e utiliza algoritmos evolutivos criados por Schütze, Paly e Shamir (2011) para criar essa série diária de demanda de irrigação. Para isso, é realizada a alocação quantitativa e temporal de uma lâmina total com objetivo de que maximizar a produção por volume de água, gerando uma demanda variável ao longo do tempo.

Neste estudo, foi alocada a lâmina total de 60 mm e foi definida a data de plantio como primeiro de maio, a fim enquadrar o cultivo nos meses que apresentam as menores temperaturas e déficits hídricos e os maiores volumes de chuvas, que são maio, junho e julho. Além disso, é geralmente entre esses meses que se realizam os principais cultivos agrícolas da região, de acordo com o calendário agrícola da região (SANTOS; MARTINS; SANTOS, 2018). Finalmente, foram utilizados os dados apresentados na Tabela 4.1 para calibrar o modelo.

Para realizar a análise financeira, considerou-se a análise para um período de 20 anos, por ser essa a vida útil do SAAC, e a TMA foi definida como 2,94%, correspondente à taxa Selic média anual (BCB, 2021).

Tabela 4.1 - Dados do solo e da cultura necessários para realizar as modelagens

Característica	Valor	Unidade	Fonte
Altura máxima da planta	2	m	Allen <i>et al.</i> (1998)
Capacidade de Campo e Ponto de Murcha Permanente do solo (Textura franco-arenosa)	22; 10	%	Raes (2017)
Coefficiente basal inicial e médio (Milho)	0,15; 1,15	-	Allen <i>et al.</i> (1998)
Coefficientes da cultura (Milho)	0,72; 1,11; 1,49; 1,09	-	Alves <i>et al.</i> (2014)
Duração das fases fenológicas (Milho)	25; 28; 23; 32	dias	Alves <i>et al.</i> (2014)
Produtividade máxima (Milho)	7	t. ha ⁻¹	Doorenbos e Kassam (1979)
Profundidade inicial da semeadura (Milho)	6	cm	Valentini <i>et al.</i> (2021)
Profundidade máxima efetiva (Milho)	1,3	m	Allen <i>et al.</i> (1998)

Os investimentos iniciais envolvidos na construção do SAAC foram obtidos na etapa de otimização da cisterna-calçadão. Também foi considerado um kit para irrigação de gotejamento destinado à agricultura familiar fabricado pela empresa Netafim, o qual permite a irrigação de áreas de até 500 m² e é composto por válvulas de controle, filtros, tubos de distribuição de água e por linhas de irrigação por gotejamento (NETAFIM, 2019). Nesse kit não é incluído um reservatório elevado, assim também foi considerado uma caixa d'água em polietileno de 500 litros, o qual vai ser abastecido pela água de chuva armazenada no SAAC elevada por uma motobomba autoescorvante a gasolina.

Já os insumos necessários para cada cultivo do milho foram estimados a partir dos dados apresentados na Tabela 4.2. Ressalta-se que não se considerou o esterco, pois foi adotado que seria utilizado o produzido na própria comunidade agrícola.

Tabela 4.2 – Insumos necessários para cada período o cultivo do milho, em uma área de 4.000 m²

Descrição	Quant.	Unid.	Referência
Calcário	74	kg	Massad <i>et al.</i> (2014)
Herbicida	1	L	Oliveira <i>et al.</i> (2018)
Inseticida	0,5	L	Oliveira <i>et al.</i> (2018)
Semente de milho	10.000	un.	Lira <i>et al.</i> (2010)

Apesar do objetivo da construção do SAAC em uma localidade semiárida ser a garantia da segurança alimentar e hídrica dos agricultores familiares, considerou-se que as receitas anuais decorrem da situação hipotética da venda de toda a produção, avaliando

o preço médio anual divulgado pela Companhia Nacional de Abastecimento: R\$1,18 por quilo de milho (CONAB, 2021)

4.2.1.2 Estudo de caso 2

Na análise para fins pecuários, foi avaliada a necessidade hídrica diária de 250 L, que é a suficiente para atender dois rebanhos de 50 cabras por ano, considerando a demanda per capita diária de $5L \cdot dia^{-1}$ e o período de crescimento das cabras de seis meses (IABS, 2011).

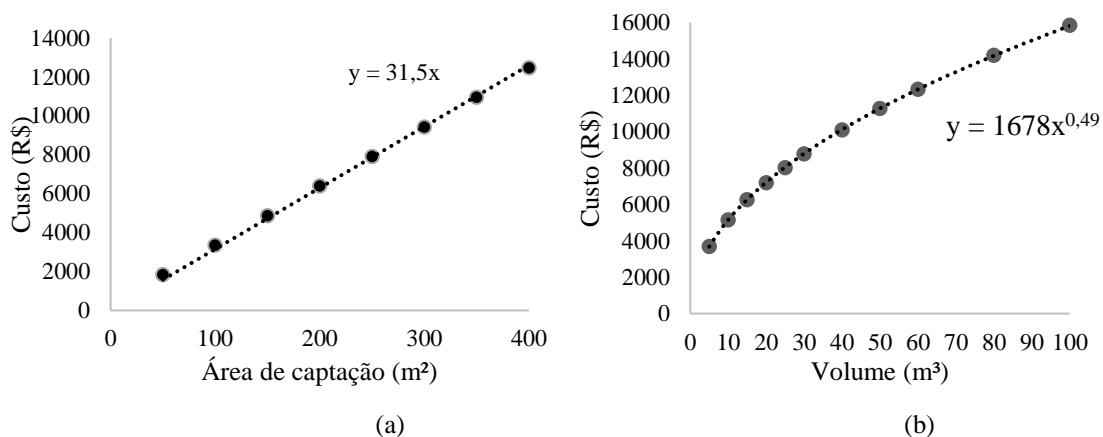
4.2.1.3 Estudo de caso 3

Foi avaliada a necessidade hídrica diária resultante da soma da demanda da irrigação suplementar com déficit hídrico utilizada no cultivo do milho em uma área de $4.000 m^2$ (estudo de caso 1) com a de 250 litros, que é a suficiente para suprir dois rebanhos de 50 cabras por ano (estudo de caso 2).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As equações de custo de construção de cada componente da cisterna-calçadão são exibidas na Figura 4.1, sendo que os gastos referentes à área de captação apresentam comportamento linear e os da cisterna, exponencial.

Figura 4.1 - Equações de custo da construção da área de captação (a) e da cisterna (b)



4.3.1 ESTUDO DE CASO 1: ATENDIMENTO DA DEMANDA AGRÍCOLA

As equações de custo apresentadas na Figura 4.1 foram utilizadas no TOROH (Figura 4.2) para que possa ser indicada a combinação de área de captação e de volume de cisterna que atende à EA de 75% e que apresenta o menor custo total de construção. Apesar de outras ferramentas computacionais também serem direcionados aos SAACs,

como o Netuno (GHISI; CORDOVA, 2014) e o SIMCAP (MARCONI; BRANDÃO, 2018), a identificação da melhor combinação não é realizada nesses *softwares*. Assim, essa etapa se torna muito laboriosa, pois se exige muitas interações nas simulações até que se possibilite determinar a que minimiza os custos.

Desse modo, o TOROH contribui ao possibilitar realizar todas essas simulações automaticamente, sendo necessário apenas inserir o intervalo de área de captação e o incremento a ser variado. Essa ferramenta também permite exportar um arquivo *csv* com todos os resultados dos custos totais e os de cada componente do SAAC das combinações. Um recorte desses resultados está representado na Tabela 4.3.

Figura 4.2 - Representação do módulo de dimensionamento e otimização do SAAC em áreas rurais do TOROH: Demanda da irrigação suplementar com déficit hídrico utilizada no cultivo do milho em uma área de 4.000 m² na região de Feira de Santana - Bahia

The screenshot shows the TOROH software interface with the following details:

- Input Fields:**
 - Área Inicial: 0 m²
 - Área Final: 600 m²
 - Intervalo de área: 15 m²
 - Volume Máximo: 100000 L
 - Volume Mínimo: 100 L
 - Intervalo de volume: 1000 L
 - Demanda diária: G:/Meu Drive/MES (Browse)
 - Eficiência de atendimento: 75 %
- Options:**
 - Radio buttons for 'Fixa' and 'Variável' (selected).
 - Radio buttons for 'Linear: C = a.A + b' (selected) and 'Exponencial: C = a.A^b'.
 - Radio buttons for 'Linear: C = c.V + d' (selected) and 'Exponencial: C = c.V^d'.
 - Parameters: a = 31.5, b = 0, c = 1678, d = 0.49
 - Coef. de esc. superficial: 0.8
 - Dados de Precipitação: G:/Meu Drive/MESTRADO/Artigo 3/F (Browse)
- Buttons:** Ok, Gráfico, Limpar, Sair, Exportar, Salvar.
- Results Window (Processando...):**
 - Dados de Custo Mínimo:
 - Área (m²): 180.00
 - Volume (m³): 47.10
 - Eficiência de atendimento (%): 75.09
 - Custo da Cobertura (R\$): 5670.00
 - Custo do Reservatório (R\$): 11080.83
 - Custo Sistema de água (R\$): 16750.83

Tabela 4.3 - Custos de construção de cada combinação e o total do SAAC em Feira de Santana - BA

Área (m ²)	Volume (m ³)	EA (%)	Custo da captação (R\$)	Custo da cisterna (R\$)	Custo total (R\$)
150	66,1	75,1	4.725,0	13.082,5	17.807,5
165	52,1	75,0	5.197,5	11.642,4	16.839,9
180	47,1	75,1	5.670,0	11.080,83	16.750,8
195	44,1	75,3	6.142,5	10.729,19	16.871,7
210	41,1	75,0	6.615,0	10.365,12	16.980,1
225	39,1	75,3	7.087,5	10.114,83	17.202,3
240	37,1	75,4	7.560,0	9.857,92	17.418,0

255	35,1	75,5	8.032,5	9.593,84	17.626,3
270	33,1	75,3	8.505,0	9.321,97	17.827,0
285	31,1	75,0	8.977,5	9.041,58	18.019,1

Verifica-se que à medida que a área de captação aumenta, o custo associado à sua construção também cresce. Porém, o referente à cisterna desce, o que mostra que existe um ponto de menor custo total, que é constituída por uma área de 180 m² e por um volume de cisterna de 47,1 m³, sendo necessário um investimento de R\$16.750,8.

Na literatura, estão disponíveis outras alternativas para realizar a otimização dos SAACs, sendo o custo a variável mais utilizada nesse processo. A abordagem mais recorrente é a que avalia o custo de água do tratamento centralizado que seria poupado por conta do uso da água de chuva (SEMAAN *et al.*, 2020). No entanto, esse enfoque não seria adequado para este estudo nem para 25,1% da população do nordeste brasileiro que não são atendidas pela concessionária (SNIS, 2020).

No estudo da viabilidade financeira, os investimentos iniciais são constituídos pela implementação do SAAC e do sistema de irrigação por gotejamento (Tabela 4.4). Já as despesas anuais envolvidas na aquisição dos insumos somam R\$137,9 (Tabela 4.5) e as receitas anuais são de R\$2.377 obtidas com a venda dos 2.014,6 quilos de milho.

Tabela 4.4 - Investimentos para implantar o SAAC e o sistema de irrigação na região de Feira de Santana

Descrição	Quant.	Unid.	Custo unit. (R\$)	Custo total (R\$)	Referência
Caixa d'água em polietileno, 500 L	1	un.	240	240	SINAPI (2021)
Kit Netafim	1	un.	1500	1.500	Terwal Máquinas (2021)
Motobomba a gasolina	1	un.	2167	2.167	SINAPI (2021)
SAAC	1	un.	16.750,8	16.750,8	ORSE (2021); SINAPI (2021)

Tabela 4.5 - Despesas anuais com os insumos para a produção do milho na região de Feira de Santana

Descrição	Quant.	Unid.	Custo unit. (R\$)	Custo total (R\$)	Referência
Calcário	74	kg	0,15	11,1	MFRURAL (2021)
Herbicida	1	L	16	15,7	CONAB (2021b)
Inseticida	0,5	L	35	16,8	CONAB (2021b)
Semente de milho	10.000	un.	0,01	94,3	CONAB (2021b)

A partir disso, obteve-se VPL positivo de R\$ 12.843,3 e quociente entre receitas e custos de 1,57 (Figura 4.3). Assim, é viável a implementação do SAAC otimizado e do sistema de irrigação para atender à demanda do milho, mesmo essa cultura apresentando um baixo preço de venda em comparação com outras que podem ser cultivadas no

semiárido com o uso do sistema de irrigação viabilizado pelo SAAC. Nesse mesmo sentido, a viabilidade do SAAC também foi verificada para produção de laticínios, com demanda de 750 L.dia⁻¹, na Uganda (MUHIRIRWE *et al.*, 2022).

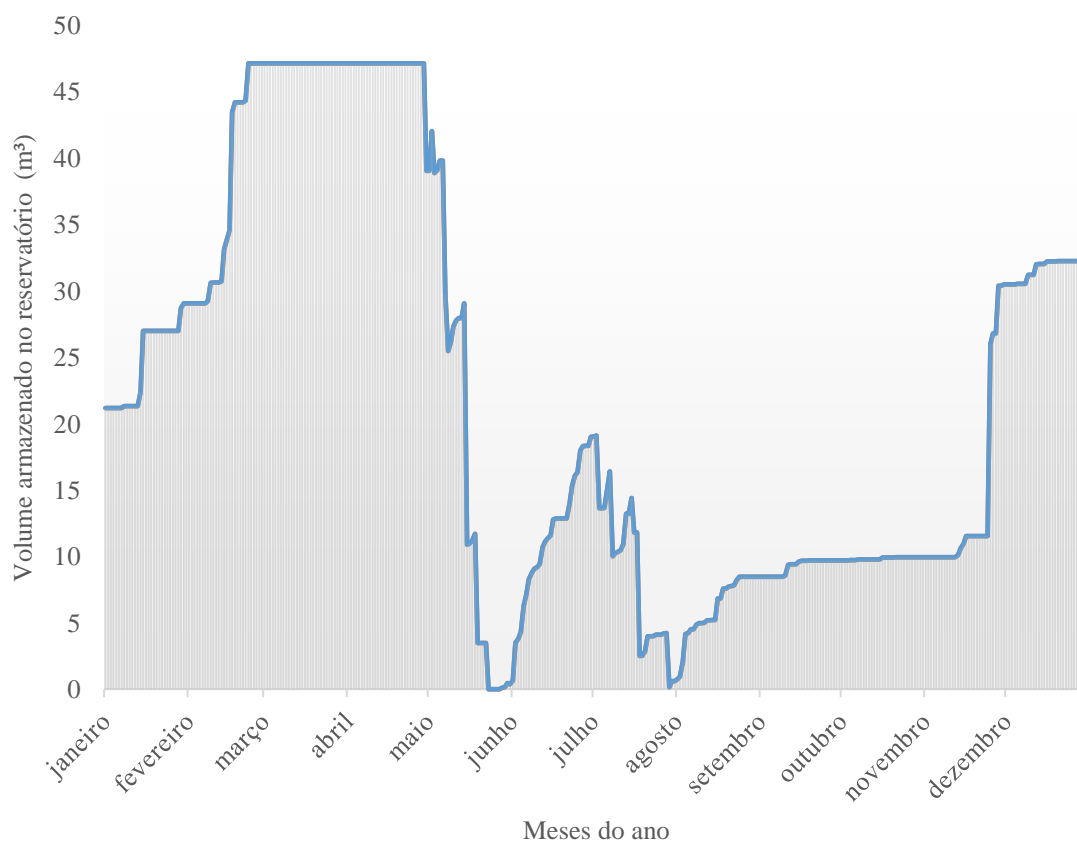
Figura 4.3 - Representação do módulo de análise financeira em áreas rurais no TOROH

The screenshot displays the TOROH software interface for financial analysis in rural areas. The interface is organized into several sections:

- Navigation Tabs:** 'Análise de eficiência', 'Dimensionamento', 'Análise Mensal', 'Dimensionamento e Otimização', 'Demanda (irrigação)', 'Análise econômica', and 'Análise econômica (rural)'. The 'Análise econômica' tab is currently selected.
- Custos Principais (Main Costs):**
 - Investimentos iniciais: 16750.8 (R\$)
 - Cultura:
 - Produção: 2014.6 (kg)
 - Preço de venda: 1.18 (R\$)
 - Há criação de animais? Sim Não
 - Custo com animais: 0 (R\$)
 - Quantidade de Animais: 0
 - Preço de venda - Animais: 0 (R\$)
- Outros Custos (R\$) (Other Costs):**
 - Sistema de Irrigação: 3907
 - Sementes/mudas: 94.3
 - Preparação do Terreno: 0
 - Controle de plantas daninhas: 16.8
 - Calagem: 11.1
 - Adubação: 0
 - Mão de Obra: 0
 - Outros: 15.7
- Additional Parameters:**
 - Taxa min. de atratividade: 2.94 (%)
 - Tempo de análise: 20 anos
 - Coef. de esc. superficial: 0.8
 - Dados de Precipitação: G:/Meu Drive/MESTRADO/Artigo 3/F (Browse)
- Summary and Controls:**
 - Buttons: Ok, Gráfico, Limpar, Sair, Exportar, Salvar
 - Summary Box:
 - Custo de Implementação: R\$ 20667.80
 - Valor Presente Líquido: R\$ 12843.31
 - B/C: 1.57

Por fim, ressalta-se que há demanda da água armazenada no SAAC dimensionado apenas durante o cultivo agrícola do milho (maio a agosto), ficando o sistema ocioso nos outros meses (Figura 4.4). Desse modo, recomenda-se a criação de pequenos animais ou a plantação de culturas que apresentam ciclo curto (por exemplo: milho, feijão, soja e algodão) ao longo dos outros meses, com o intuito de aproveitar melhor a água captada e possibilitar aumentar ainda mais os retornos financeiros dos pequenos produtos.

Figura 4.4 - Volume de água simulado disponível na cisterna, considerando a demanda do milho na região de Feira de Santana (1998-2017)



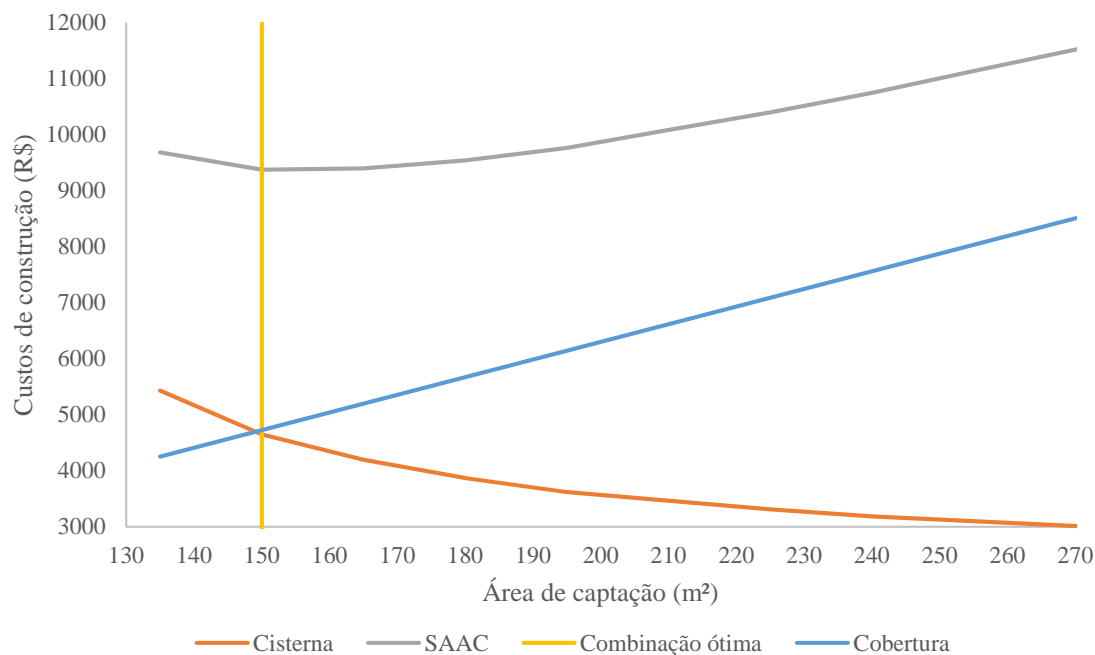
4.3.2 ESTUDO DE CASO 2: ATENDIMENTO DA DEMANDA DA PECUÁRIA

Nas simulações realizadas no TOROH, foram obtidos os custos de construção da área de captação e do volume da cisterna e o total de cada combinação, os quais são exibidos na Figura 4.5. Nota-se que não foi indicada uma dimensão de cisterna que atendesse à demanda hídrica das cabras com áreas inferiores a 130 m², pois, mesmo que se aumentasse muito o volume, não haveria captação de água necessária para enchê-la. Ademais, percebe-se que, à medida que a área de captação aumenta, o custo associado à sua construção também cresce. Porém, o referente à cisterna decresce, o que mostra que existe de fato um ponto de menor custo total, que consiste na área de captação de 150 m² e na cisterna de 8 m³, sendo necessário um investimento de R\$9.373,4.

Essas dimensões são inferiores ao padrão estabelecido pelo Programa Uma Terra e Duas Águas, a saber: cisterna com 52 m³ e área de captação do tipo calçadão com 200 m² (ASA, 2021b). Desse modo, o dimensionamento contribui para a redução dos investimentos necessários para a construção do SAAC, principalmente quando realizado

juntamente com a etapa de otimização. Isso foi evidenciado por Imteaz e Shadeed (2022), quando constataram que a capacidade das cisternas encontrada por um dimensionamento otimizado é metade do indicado pelo método de Rippl em um estudo na Palestina.

Figura 4.5 – Custos envolvidos na construção dos componentes do sistema e o total para demanda de 50 cabras na região de Feira de Santana (BA)



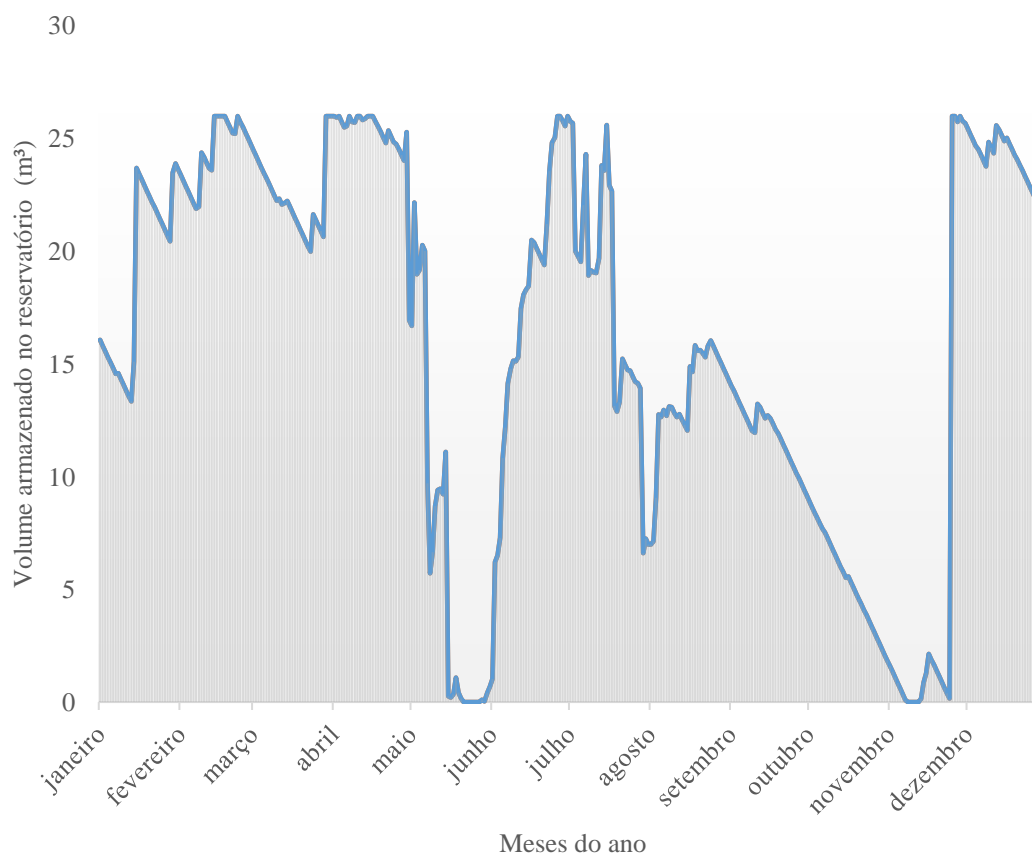
O dimensionamento possibilita o abastecimento mais seguro. Isso interfere no bem-estar das cabras e na melhoria da saúde delas, pois diminui o estresse causado pela falta de água e os casos de verminoses, que está relacionada com a inadequação da qualidade hídrica. Desse modo, permite-se ampliar a produção e melhorar a sua qualidade, contribuindo para reduzir a insegurança alimentar, que alcança 50,3% dos lares localizados no nordeste brasileiro, onde o clima predominante é o semiárido (IBGE, 2020; MAD-ALI; MASNIYOM; BENJAKUL, 2018; MENGISTU *et al.*, 2016).

4.3.3 ESTUDO DE CASO 3: ATENDIMENTO DA DEMANDA DA PECUÁRIA E A DA AGRICULTURA

O SAAC ótimo indicado, no TOROH, para atender à demanda da dessedentação das cabras e a da irrigação suplementar utilizada no cultivo milho é constituído por uma área de captação de 345 m², por uma cisterna de 26,1 m³, sendo necessário um investimento inicial de R\$19.165. Esse custo é apenas 14% superior ao indicado para a demanda apenas da agricultura (estudo de caso 1) e possibilita a geração de mais renda para os pequenos produtores e o melhor uso da água armazenada nos SAACs,

proporcionando a redução do pico de água armazenada nos meses do cultivo do milho e a não ociosidade nos demais meses (Figura 4.6).

Figura 4.6 - Volume de água simulado disponível na cisterna, considerando a demanda do milho e das cabras na região de Feira de Santana (1998-2017)



Por fim, ressalta-se que a estimação das dimensões ótimas colabora com o Plano Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 2022), pois é apontada a necessidade de realização de pesquisas sobre o uso de técnicas de SAACs, objetivando o desenvolvimento de metodologias para auxiliar na escolha mais adequada para aplicação em uma região. Também permite reduzir o uso de fontes secundárias de água que comprometem a qualidade dos recursos hídricos armazenados na cisterna. Isso foi evidenciado por Moraes (2016), quando verificaram inclusive a presença de coliformes totais na mistura de água de chuva com água de carros-pipas em cisternas localizadas no estado de Sergipe no Brasil.

Ademais, colabora com o fortalecimento das técnicas de descentralização de abastecimento de água, reduzindo a exploração das fontes superficiais e subterrâneas. Isso é importante, pois houve a diminuição da superfície de água da Caatinga (bioma

predominante no semiárido brasileiro) em 8,3%, ou seja, cerca de 800 km², nos anos de 1985 a 2020 (MAPBIOMAS, 2021).

4.4 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram apresentadas algumas das funcionalidades da ferramenta computacional TOROH. Além disso, foram realizados três estudos de caso com objetivo de realizar o dimensionamento e a otimização do sistema de captação e armazenamento de água de chuva no atendimento de três demandas na área rural de Feira de Santana – Bahia – Brasil, a saber: sistema de irrigação suplementar com déficit hídrico utilizado no cultivo de milho em uma área de 4.000 m²; dessedentação de dois rebanhos de 50 cabras; demanda da irrigação e das cabras conjuntamente.

Essa ferramenta apresentou um bom desempenho nessas análises, possibilitando obter que SAAC ótimo para atender à irrigação por gotejamento necessita de um investimento de R\$16.750,8 para construir uma área de captação de 180 m² e uma cisterna de 47,1 m³. A implementação desse sistema apresentou viabilidade financeira, sendo obtido Valor Presente Líquido positivo de R\$12.843,3 e quociente entre receitas e custos de 1,57.

Também foi indicado que o SAAC ótimo para atender à demanda de dois lotes de 50 cabras no ano necessita de um investimento de R\$9.373,4 e que o custo inicial para implementar o SAAC ótimo para atender à demanda conjunta da agricultura e da pecuária é apenas 14% ao que foi indicado para apenas a irrigação, proporcionando o melhor aproveitamento da água armazenada e possibilitando gerar mais renda para o pequeno agricultor.

Nessas situações, foram utilizadas apenas as funcionalidades do TOROH referente às áreas rurais, em que a função objetivo corresponde à minimização do investimento inicial para implementar o SAAC, considerando os custos com a construção da área de captação e a cisternas. Porém, essa ferramenta também possibilita analisar áreas urbanas, em que há o abastecimento hídrico decorrente da água advinda das concessionárias e a de chuva armazenada nos SAACs. Desse modo, recomenda-se para etapas futuras a simulação de estudos em localidades urbanas e também a análise de áreas que não apresentam clima de semiárido, a fim de avaliar outras condições climáticas.

4.5 FINANCIAMENTO DA PESQUISA

Esta pesquisa contou com o incentivo da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), a qual concedeu bolsa de Mestrado e de Iniciação Científica (IC) aos autores 1 e 3, respectivamente. Ao CNPQ por disponibilizar bolsa de IC ao autor 4.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15527. **Água de chuva** - Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis - Requisitos, 2019.

ALLEN, R. G. *et al.* **Crop Evapotranspiration**: Guidelines for computing crop water requirements, Rome: FAO, 1998, 301p. Irrigation and Drainage Paper 56.

ALMEIDA, C.; BEBÉ, F.; LIMA, P.; SILVA, M.; FREITAS, P. Cenário da agricultura familiar em comunidades quilombolas do Território Sertão Produtivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA, 10, 2017, Brasília. **Anais ...** Brasília: ABA, p. 1-7.

ALMEIDA, L. M. F.de; ARAUJO, J. F.; ORRICO, S. R. M.; COHIM, E. VOLUME DE CISTERNAS RURAIS: uma contribuição para abastecimento regular de água. **Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo y Práctica**, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 639, 6 ago. 2021. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2021.14.2.72265>

ALVES, A. da S. *et al.* Necessidades hídricas da cultura do milho sob irrigação suplementar nas condições edafoclimáticas da chapada do Apodi. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 2. 2014, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: Inovagri, 2014. p. 1-7.

ANDRADE, E. M. de; AQUINO, D. do N.; CHAVES, L. C. G.; LOPES, F. B. Water as Capital and Its Uses in the Caatinga. In: SILVA, J. M. C. da; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. (ed.). **Caatinga**: the largest tropical dry forest region in South America. [S. L]: Spring, 2017. p. 281-301.

ASA - ARTICULAÇÃO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. **Semiárido - é no semiárido que a vida pulsa!** Disponível em: <http://www.asabrasil.org.br/semiarido>. Acesso em: 09 jun. 2021a.

ASA - ARTICULAÇÃO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. **Ações - P1+2**. Disponível em: <https://www.asabrasil.org.br/acoes/p1-2>. Acesso em: 11 out. 2021b.

BAPTISTA, N.; CAMPOS, C. H. **Caracterização do Semiárido brasileiro**. 2014. Disponível em: <http://www4.planalto.gov.br/consea/comunicacao/artigos/2014/caracterizacao-do-semiarido-brasileiro>. Acesso em: 09 jun. 2021.

BCB - BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Meta para a taxa Selic. 2021.** Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estatisticas/grafico/graficoestatistica/metaselic>. Acesso em: 01 out. 2021.

BRANDÃO, J. L. B.; MARCON, P. SIMCAP: ferramenta computacional para auxiliar a tomada de decisão sobre a implantação de sistemas de captação de águas pluviais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 23, n. 6, p. 1027-1030, dez. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522018129229>

BRASIL, Ministério do Desenvolvimento Regional. **Plano Nacional de Recursos Hídricos: 2022-2040.** Brasília, 2022. 204 p.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Preços agrícolas, da sociobio e da pesca.** Disponível em: <http://sisdep.conab.gov.br/precosiagroweb/>. Acesso em: 13 maio 2021.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water.** Rome: FAO, 1979. 193p. Irrigation and Drainage Paper, 33.

EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema de Produção de Melancia.** 2009. Disponível em: <https://shortest.link/Prw>. Acesso em: 20 abr. 2021.

FAO - ORGANIZAÇÃO PARA A ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA. **AquaCrop.** Disponível em: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>. Acessado em 26 Jun. 2021.

FARRICK, K. K.; BRANFIREUN, B. A. Flowpaths, source water contributions and water residence times in a Mexican tropical dry forest catchment. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 529, p. 854-865, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.059>

FEWKES, A. Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalised approach. **Urban Water**. Nottingham, v. 1, n. 4, p. 323-333, 2000.

GHISI, E.; CORDOVA, M. M. **Netuno 4** - Manual do Usuário. Santa Catarina, 2014.

GIFFONI, V. V. **Otimização do sistema de captação e armazenamento de água de chuva no semiárido baiano.** 2019. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2019.

IABS - INSTITUTO AMBIENTAL BRASIL SUSTENTÁVEL. **Manual de criação de caprinos e ovinos.** Brasília: CODEVASF, 2011. 142 p.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa de Orçamentos Familiares: 2017 - 2018.** Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Semiárido Brasileiro.** 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do->

territorio/estrutura-territorial/15974-semiarido-brasileiro.html?t=sobre. Acesso em: 09 nov. 2021.

IMTEAZ, M. A.; SHADEED, S. Superiority of water balance modelling for rainwater harvesting analysis and its application in deriving generalised equation for optimum tank size. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 342, p. 130991, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130991>.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. 2018. Dados climatológicos de Feira de Santana. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em 11 Out., 2021.

LEDRU, M.; JESKE-PIERUSCHKA, V.; BREMOND, L.; DEVELLE, A.; SABATIER, P.; MARTINS, E. S. P. R.; FREITAS FILHO, M. R. de; FONTENELE, D. P.; ARNAUD, F.; FAVIER, C. When archives are missing, deciphering the effects of public policies and climate variability on the Brazilian semi-arid region using sediment core studies. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 723, p. 137989, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137989>

LIRA, M. A. *et al* (org.). **Recomendações técnicas para a cultura do milho**. Natal: EMPARN, 2010.

MAD-ALI, S.; MASNIYOM, P.; BENJAKUL, S. Characteristics and properties of goat meat gels as affected by setting temperatures. **Food Chemistry**, [S.L.], v. 268, p. 257-263, dez. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.084>.

MAPBIOMAS - PROJETO DE MAPEAMENTO ANUAL DO USO E COBERTURA DA TERRA NO BRASIL. **Mapeamento anual da cobertura e uso da terra no Brasil (1985 - 2020)**: destaques caatinga. [S. L]: Mapbiomas, 2021. 35 p.

MARCONI, P.; BRANDÃO, L. B. SIMCAP: ferramenta computacional para auxiliar a tomada de decisão sobre a implantação de sistemas de captação de águas pluviais. **Eng Sanitaria e Ambiental**, [S. L.], p. 1-4, 2018.

MASSAD, M. D. *et al*. Produtividade do milho em sistema agroecológico na caatinga mineira, **Revista Verde**, Mossoró, v. 9, n.2, p. 218-229, 2014.

MENGISTU, U. L.; PUCHALA, R.; SAHLU, T.; GIPSON, T. A.; DAWSON, L. J.; GOETSCH, A. L. Comparison of different levels and lengths of restricted drinking water availability and measurement times with Katahdin sheep and Boer and Spanish goat wethers. **Small Ruminant Research**, [S.L.], v. 144, p. 320-333, nov. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2016.10.007>

MORAIS, G. F. O. **Cisternas domiciliares**: qualidade da água para consumo humano em comunidades rurais do semiárido Sergipano. 2016. 86 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

MUHIRIRWE, S. C.; KISAKYE, V.; BRUGGEN, B. V. D. Reliability and economic assessment of rainwater harvesting systems for dairy production. **Resources**,

Conservation & Recycling Advances, [S.L.], v. 14, p. 200079, 2022.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200079>

NETAFIM. **KiFNet**: kit de irrigação familiar por gotejamento. S.L: Netafim, 2019. 12 p.

OLIVEIRA, I. J. de *et al.* (ed.). **Recomendação técnicas para o cultivo de milho no Amazonas**, Manaus: Embrapa, 2018.

ORSE - SISTEMA DE ORÇAMENTO DE OBRAS DE SERGIPE. **Sistema de Orçamento de Obras de Sergipe**. Disponível em: <https://www.cehop.se.gov.br/orse/>. Acesso em: 07 out. 2021.

RAES, D. **AquaCrop training handbooks I**: understanding Aquacrop. Roma: FAO, 2017. 59 p.

SÁNCHEZ, A. S.; COHIM, E; KALID, R. A. A Review on Physicochemical and Microbiological Contamination of Roof-Harvested Rainwater in Urban Areas. **Sustainability of Water Quality and Ecology**, v. 6, p. 119-137, 2015.

SCHÜTZE, N.; MIALYK, O. **Deficit irrigation toolbox (DIT)**: user guide. Dresden: 2019. 15 p.

SCHÜTZE, N.; PALY, M. de; SHAMIR, U. Novel simulation-based algorithms for optimal open-loop and closed-loop scheduling of deficit irrigation systems. **Journal Of Hydroinformatics**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 136-151, 2011.

SEMAAN, M.; DAY, S. D.; GARVIN, M.; RAMAKRISHNAN, N.; PEARCE, A. Optimal sizing of rainwater harvesting systems for domestic water usages: a systematic literature review. **Resources, Conservation & Recycling: X**, [S.L.], v. 6, p. 100033-100055, 2020.

SINAPI - SISTEMA NACIONAL DE PREÇOS E ÍNDICES PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL. **Índices da Construção Civil**. Disponível em: <http://goo.gl/ttgltv>. Acesso em: 07 out. 2021.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Mapa de Indicadores de Água**. 2020. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/painel-informacoes-saneamento-brasil/web/painel-abastecimento-agua>. Acesso em: 28 fev. 2022.

VALENTINI, L. *et al.* **Milho**: recomendações técnicas. **Recomendações técnicas**. Disponível em:
<http://www.pesagro.rj.gov.br/milho.html#:~:text=Profundidade%20de%20semeadura%3A%20Em%20solos,resultados%20da%20an%C3%A1lise%20de%20solo>. Acesso em: 30 set. 2021.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 2644-2659, 2016.

ZHU, Q.; GOULD, J., LI, Y.; MA, C. **Rainwater harvesting for agriculture and water supply**. Londres: Spring, 2015.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO GERAL

Neste trabalho verificou-se, a partir de simulações no *software Deficit Irrigation Toolbox* (DIT), que irrigação suplementar com déficit hídrico, no contexto da agricultura familiar na região de Feira de Santana – Bahia – Brasil, possibilita aumentar a produção do tomate em 80% comparada com a condição de sequeiro. Essa demanda pode ser atendida com Eficiência de Atendimento (EA) de 91,7% por um sistema de aproveitamento de água de chuva (SAAC) composto por uma cisterna com 52 m³ e por uma área de captação de 200 m².

Também foi verificado que a demanda de irrigação nessa situação poderia ser atendida com EA de 90% por um SAAC composto por uma área de captação como 200 m² e uma cisterna com volume de 11,1 m³. Desse modo, verificou-se que as dimensões estabelecidas (área de 200 m² e volume de 52 m³) pelo Programa Uma Terra e Duas Águas demais, podem resultar em situações de superdimensionamento.

Assim, foi proposta uma metodologia de dimensionamento otimizado dos SAAC com o intuito de evitar esses casos de superdimensionamento e também os de subdimensionamento, baseado no balanço hídrico seriado com intervalo diário e na estimação da combinação de área de captação e volume das cisternas que minimiza os custos de construção do SAAC.

Essa metodologia foi aplicada para o cultivo da cebola na mesma região. Foi obtido que o SAAC ótimo, composto por uma área de captação de 130 m² e por uma cisterna de 36,1 m³, viabiliza a irrigação suplementar com déficit hídrico, que possibilita aumentar a produção em 60%.

Por fim, foi apresentada a versão atualizada da ferramenta computacional TOROH, na qual foram implementadas as metodologias desenvolvidas neste trabalho. Assim, possibilita-se analisar e dimensionar o SAAC em locais em que não há redes de abastecimento, considerando que a água da chuva é a única fonte hídrica, pois apresenta qualidade superior às das outras disponíveis. Além disso, admite a análise de demandas fixas e variáveis ao longo do tempo, possibilita a conversão de lâminas de irrigação para volume e permite realizar o estudo de viabilidade financeira da implementação do SAAC.

O uso dessa ferramenta permitiu estimar o SAAC ótimo para atender à irrigação por gotejamento utilizada no cultivo do milho na região de Feira de Santana. Encontrou-se que se necessita de um investimento de R\$16.750,8 para construir uma área de captação de 180 m² e uma cisterna de 47,1 m³. A implementação desse sistema apresentou viabilidade financeira, sendo obtido Valor Presente Líquido positivo de R\$12.843,3 e quociente entre receitas e custos de 1,57. Também foi indicado que o SAAC ótimo para

atender à demanda de dois rebanhos de 50 cabras no ano necessita de um investimento de R\$9.373,4 e o SAAC para atender a essas duas finalidades conjuntamente, R\$19.165.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de experimentos para ajustar os parâmetros utilizados nas simulações, bem como para comprovar os resultados simulados. Essa necessidade decorre do fato de que nesse trabalho foram utilizados parâmetros disponíveis na literatura encontrados para regiões que apresentam características semelhantes à da área de estudo, além de que, por mais que essa modelagem seja, não considera alguns fatores, como a ocorrência de pragas, que certamente influenciam a produção.

Ademais, recomenda-se para etapas futuras a simulação, no TOROH, de estudos em localidades urbanas e também a análise de áreas que não apresentam clima de semiárido, a fim de avaliar outras condições climáticas.